



# Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments

Clara Spitz

## ► To cite this version:

Clara Spitz. Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments. Autre. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENA004 . tel-00768506

**HAL Id: tel-00768506**

**<https://theses.hal.science/tel-00768506>**

Submitted on 21 Dec 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Civil et Sciences de l'Habitat**

Arrêté ministériel : Arrêté ministériel : 7 Août 2006

Présentée par

**Clara SPITZ**

Thèse dirigée par **Étienne WURTZ**  
et codirigée par **Laurent MORA**

préparée au sein **LOCIE UMR CNRS 5271**  
et de **SISEO**

## Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments

Thèse soutenue publiquement le **9 mars 2012**,  
devant le jury composé de :

**M. Jean-Jacques ROUX**

Professeur, INSA Lyon, Rapporteur

**M. Bruno PEUPORTIER**

Maître de recherche, MINES ParisTech, Rapporteur

**M. Darren ROBINSON**

Professeur, Université de Nottingham, Examineur

**M. Hubert DESPRETZ**

Ingénieur ADEME, Examineur

**M. Étienne WURTZ**

Directeur de Recherche CNRS, CEA-INES, Directeur de thèse

**M. Laurent MORA**

Maître de conférence, Université de Bordeaux 1, Co-Directeur de thèse





*«Fais de ta vie un rêve, et d'un rêve, une réalité»*  
Antoine de Saint-Exupéry





---

## Remerciements

---

Ce travail de recherche a été mené au sein du laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE) dirigé par Lingai Luo Dong ainsi que dans le Laboratoire d'Energétique du Bâtiment (LEB) au CEA/INES dirigé successivement par Françoise Burgun et Olivier Fléchon. Je tiens à les remercier pour leur accueil.

Ce travail a été soutenu par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et par l'Assemblée des Pays de Savoie (APS), je leur suis particulièrement reconnaissante.

Je tiens à remercier sincèrement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail et en particulier merci :

- à M. Jean Jacques Roux, Professeur à l'INSA Lyon, pour avoir accepté le rôle de Président de jury et celui de rapporteur.
- à M. Bruno Peuportier, Maître de recherche à MINES ParisTech, pour avoir été rapporteur de ce travail.
- à M. Darren Robinson, Professeur à l'Université de Nottingham, pour avoir accepté d'être examinateur et de travailler sur un manuscrit en français.
- à M. Hubert Despretz, Ingénieur ADEME, pour son rôle d'examineur.
- à tous les membres du jury, pour les remarques constructives qui ont été apportées lors de la soutenance.
- à mon directeur de thèse M. Étienne Wurtz, Directeur de recherche au CEA/INES, pour m'avoir permis de travailler sur une problématique riche de perspectives, pour la confiance et la grande autonomie qu'il m'a accordée, me permettant de découvrir le monde de la recherche.
- à mon co-directeur de thèse M. Laurent Mora, Maître de conférence à l'université de Bordeaux, qui a su m'aider et m'orienter dans ces travaux.

- à M. Arnaud Jay, Ingénieur de recherche au CEA/INES, pour sa grande disponibilité et les conseils avisés qu’il a su me donner pour guider ces travaux de recherche.
- aux techniciens du CEA/INES, Mme Valérie Barentin, M. Jocelyn Anger et M. Didier Therme, pour avoir su répondre aux questions d’ordres techniques de la plate-forme INCAS.
- à M. Benjamin Boillot, Ingénieur de recherche au CEA/INES, pour m’avoir offert l’opportunité d’effectuer mon stage de Master 2 au CEA/INES et pour avoir été en partie à l’initiative de cette thèse.
- à M. Michael Wetter et M. Phil Haves, chercheur au LBNL, pour m’avoir accueilli durant deux mois au sein du groupe de simulation au Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) me permettant de découvrir le fonctionnement d’un laboratoire américain, d’enrichir mes connaissances et d’échanger dans le domaine de la programmation de logiciel en simulation appliquée aux bâtiments.
- à la région Rhône Alpes pour leur Bourse CMIRA Explora Doc 2009 qui m’a permis de financer une partie du séjour au Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL).
- à l’ensemble du personnel de l’INES et du LOCIE en particulier Anaïs, Anne-France, Cathy, Corinne, Fabio, Fabrice, François, Gianpiero, Guilian, Jasmin, Jérôme, Maxence, Patrice, Philippe, Pierre, Sylvain, Virginie, Timea, pour votre gentillesse, les renseignements que vous avez su me donner, pour avoir créé une ambiance de travail agréable et pour les très bons moments partagés ensemble.
- aux doctorants et anciens doctorants, Adrien, Jeanne, Layal, Louis, Mickael, Pierre, Xavier, pour leur aide apportée tout au long de ce travail ainsi que l’ambiance de travail agréable au sein d’INES.
- aux stagiaires, Emmanuel, Eric, Maxime, Robin, pour l’aide que vous avez su m’apporter pour ce travail.
- aux assistantes du CEA et aux secrétaires du LOCIE, Carole, Céline, Elisabeth, Isabelle, Laure, Martine, Mireille, Pascale, Patricia, pour m’avoir guider dans les démarches administratives.
- à mes parents Carole et Michel, et à mon frère Pierre-Paul, pour leur soutien constant, leurs conseils et encouragements.
- à Guillaume, compagnon de vie et de cordée, pour son soutien durant la thèse et particulièrement lors des moments difficiles.

Le recours à la simulation est décisif dans le processus de conception d'un bâtiment neuf. Elle permet d'évaluer différentes alternatives au regard de la performance énergétique et du confort des occupants et constitue ainsi un outil d'aide à la décision incontournable. Aujourd'hui la question de la fiabilité des codes de simulation n'est pas à négliger. L'augmentation des performances énergétiques des bâtiments, pourrait mettre en défaut un certain nombre d'hypothèses de modélisation généralement admises pour les bâtiments standards du fait de la prépondérance nouvelle de phénomènes physiques jusqu'alors négligés ou mal pris en compte. Dans le même temps on s'intéresse de plus en plus à la garantie de performance qui consiste à vérifier que les performances énergétiques réelles sont bien en adéquation avec les objectifs fixés lors de la conception or il est souvent constaté des erreurs entre consommation mesurée et estimée compte tenu des incertitudes liées notamment à la mise oeuvre, aux occupants et aux conditions météorologiques. L'augmentation des exigences de précision des calculs qui en résulte rend essentiel d'apprécier les incertitudes associées à ces prévisions afin d'améliorer le processus de construction et d'évaluation.

Les travaux de cette thèse portent en particulier sur l'évaluation et la hiérarchisation des incertitudes sur les résultats des simulations en phase de conception. Une méthodologie a été développée basée en trois temps qui permet d'identifier les paramètres de conception les plus influents sur la performance énergétique d'un bâtiment et de rendre compte des effets de l'incertitude associée à ces paramètres sur cette même performance. La première étape consiste à identifier parmi l'ensemble des paramètres du modèle ceux qui ont une influence sur le résultat qui nous intéresse. Celle-ci est assurée au moyen d'une analyse de sensibilité locale du modèle. La deuxième étape consiste à évaluer les incertitudes associées à ces paramètres les plus influents afin de propager cette incertitude dans le code de calcul et évaluer l'incertitude sur le résultat. Cette étape est effectuée au moyen d'approches probabilistes de type Monte Carlo. Nous ajoutons une troisième étape de manière à évaluer la responsabilité de chacun des paramètres sur les incertitudes associées au résultat. Cette information est cruciale pour l'utilisateur. Cette dernière étape est traitée au moyen d'une analyse de sensibilité globale sur un jeu de paramètres réduit. Nous nous sommes appuyés sur la plateforme expérimentale INCAS située à l'INES au Bourget du Lac (73) pour identifier les incertitudes de mesure mais aussi les incertitudes dont les hypothèses de modélisation font l'objet.

Cette méthodologie pourra être utilisée durant tout le processus de conception d'un bâtiment, des premières esquisses à son exploitation. En phase de conception, cette méthodologie permettra d'orienter les choix architecturaux en évitant des options dont la fiabilité des résultats est incertaine. En phase d'exploitation, elle permettra d'identifier les points de mesure les plus pertinents, afin de réduire l'incertitude des paramètres les plus influents pour effectuer un diagnostic énergétique plus fiable du bâtiment. Elle pourra aussi s'étendre aux incertitudes liées aux occupants et aux conditions météorologiques.

Mots clés : incertitude, fiabilité, simulation dynamique, bâtiments basse consommation, analyses de sensibilité, paramètres influents.



---

## Abstract

---

Nowadays, simulation tools are widely used to design buildings since their energy performance is increasing. Simulation is used to predict building energy performance and to improve thermal comfort of occupants, but also to reduce the environmental impact of the building over its whole life cycle and the cost of construction and operation. Simulation becomes an essential decision support tool, but its reliability should not be ignored. Hypothesis, made 10 years ago for buildings conception, are often not adapted to the new constructions because of physical phenomena which until now were overlooked. At the same time, guarantees of energy efficiency, which aims to check if actual energy performances are matching the conception goals, are becoming important. But there are usually differences between measured and simulation data. They may be the result of mistakes and unknowns on input parameters, on schedule occupation or on weather data. Today it's important to evaluate simulation and measurement reliability and uncertainties to improve design building.

This PhD work aimed to evaluate and order simulation results uncertainties during the design building process. A methodology in three steps was developed to determine influential parameters on building energy performance and to identify the influence of these parameters uncertainty on the building performance. The first step uses the local sensitivity analysis and identifies the most influential parameters on the outputs among all parameters. This step enables to reduce the number of parameters which is necessary to proceed the following steps. The second step is an uncertainty analysis focuses on quantifying uncertainty in model outputs. This step is conducted with the Monte Carlo probabilistic approach. The last step uses global sensitivity analysis which is the study of how uncertainty in the output of a model can be apportioned to different sources of uncertainty in the model input. This methodology was applied to the INCAS experimental platform of the French National Institute of Solar Energy (INES) in Le-Bourget-du-Lac to identify measure uncertainties and uncertainties on simulation hypothesis.

This methodology may be used during the whole building design process, from the first sketches to the operating phase. It will enable to guide the architectural and technical choices and to avoid unstable options with important uncertainty. During the exploitation stage, this methodology will allow to identify the most suitable measurement in order to reduce parameters uncertainties and consequently to get the energy diagnostic more reliable. Moreover this methodology could also be used to determine uncertainties on related to occupancy and to weather conditions.

Keyword : uncertainty, reliability, simulation, low energy building, sensitivity analysis, influential parameter.



---

## Tables des matières

---

<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Résumé</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Tables des matières</b>	<b>xi</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>xiii</b>
<b>Table des figures</b>	<b>xix</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xxii</b>
<b>Introduction</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Le monde incertain de la simulation du bâtiment</b>	<b>1</b>
1.1 Les enjeux de l'utilisation de la simulation thermique dynamique . . .	2
1.2 La problématique de la garantie de performance . . . . .	2
1.3 La problématique de la fiabilité des outils de simulation . . . . .	7
1.3.1 Identification et caractérisation des sources potentielles de biais et d'incertitude . . . . .	7
1.3.2 Les outils de simulation sont-ils fiables ? . . . . .	7
1.3.3 Les incertitudes dans la modélisation des bâtiments à faible consommation énergétique . . . . .	9
1.3.4 Les outils de simulation et bâtiment à faible consommation énergétique . . . . .	12
1.3.4.1 Outils utilisés au niveau national . . . . .	12
1.3.4.2 Outils utilisés au niveau international . . . . .	14
1.4 État de l'art des méthodes d'analyses de sensibilité . . . . .	16
1.4.1 Description des méthodes d'analyse de sensibilité . . . . .	16
1.4.1.1 Méthode de Screening . . . . .	17



1.4.1.2	Analyses de sensibilité locale . . . . .	17
1.4.1.3	Plans d'expérience . . . . .	18
1.4.1.4	Analyses de sensibilité globale . . . . .	19
1.4.2	Analyse d'incertitude . . . . .	26
1.5	Conclusion . . . . .	28
<b>2</b>	<b>La problématique des incertitudes en regard d'une plateforme d'ex- périmentation</b>	<b>31</b>
2.1	Cadre d'étude : les maisons INCAS . . . . .	32
2.1.1	La plate-forme INCAS . . . . .	32
2.1.2	Description des maisons INCAS double mur et béton . . . . .	33
2.1.2.1	Présentation de la géométrie commune . . . . .	33
2.1.2.2	Caractérisation de l'enveloppe . . . . .	33
2.1.2.3	Traitements des points singuliers . . . . .	36
2.1.2.4	Renouvellement d'air et systèmes énergétiques . . . . .	37
2.1.3	Description de l'expérimentation mise en place . . . . .	37
2.1.3.1	Les stations météo . . . . .	38
2.1.3.2	Métrologie dans les maisons . . . . .	41
2.2	La problématique des incertitudes sur l'exemple de la plateforme d'ex- périmentation . . . . .	43
2.2.1	Évaluation de la fiabilité des données sur deux bâtiments suite à un arrêt du chauffage . . . . .	44
2.2.2	Incertainitudes sur les champ de température . . . . .	47
2.2.3	Incertainitudes concernant les sollicitations extérieures . . . . .	51
2.2.4	Incertainitudes concernant la distribution aéraulique . . . . .	51
2.2.5	Détermination d'une plage d'incertitude sur la mesure de la température d'air . . . . .	59
2.3	Conclusion . . . . .	64
<b>3</b>	<b>La validation des modèles numériques des maisons INCAS</b>	<b>67</b>
3.1	Validation des modèles thermiques . . . . .	68
3.2	Description de l'outil numérique : EnergyPlus . . . . .	69
3.2.1	Description d'EnergyPlus . . . . .	69
3.2.2	Validations réalisées sur l'outil . . . . .	71
3.2.3	Présentation du fichier météo d'EnergyPlus . . . . .	71
3.3	Hypothèses de modélisation . . . . .	72
3.4	Confrontation entre modèle et expérimentation . . . . .	77
3.4.1	Initialisation de la simulation . . . . .	77
3.4.2	Premiers résultats de simulation . . . . .	81
3.4.3	Validation du fichier météo : rayonnement incident . . . . .	81
3.4.4	Validation des zones non chauffées . . . . .	83
3.4.5	Cas 1 : la maison double mur . . . . .	86
3.4.6	Cas 2 : la maison en béton banché . . . . .	93
3.5	Conclusion . . . . .	94

<b>4</b>	<b>Simulations et étude des paramètres influents des maisons INCAS</b>	<b>97</b>
4.1	Démarche d'évaluation des incertitudes . . . . .	98
4.2	Cas 1 : Incertitude sur les besoins en chauffage et le confort dans trois bâtiments . . . . .	99
4.2.1	Description des bâtiments considérés . . . . .	99
4.2.1.1	Enveloppes . . . . .	99
4.2.1.2	Scénarios . . . . .	100
4.2.1.3	Hypothèses de simulation . . . . .	101
4.2.1.4	Résultats de simulation . . . . .	101
4.2.2	Recherche des paramètres influents . . . . .	104
4.2.2.1	Analyse de sensibilité locale . . . . .	104
4.2.2.2	Paramètres étudiés . . . . .	104
4.2.2.3	Mise en place des séries de simulations . . . . .	104
4.2.2.4	Résultats de l'analyse de sensibilité locale . . . . .	105
4.2.3	Quantification et propagation des incertitudes . . . . .	112
4.2.3.1	Analyse d'incertitude . . . . .	112
4.2.3.2	Paramètres considérés et leurs plages d'incertitudes . . . . .	113
4.2.3.3	Mise en place des séries de simulations . . . . .	117
4.2.3.4	Résultats des analyses d'incertitudes . . . . .	117
4.2.4	Paramètres influents et plages de variation . . . . .	120
4.2.4.1	Analyse de sensibilité globale . . . . .	120
4.2.4.2	Mise en place des séries de simulations . . . . .	120
4.2.4.3	Résultats . . . . .	121
4.2.4.4	Analyse des résultats . . . . .	123
4.2.5	Conclusion . . . . .	125
4.3	Cas 2 : Incertitudes associées aux températures d'air intérieur . . . . .	127
4.3.1	Analyse de sensibilité locale . . . . .	127
4.3.2	Étude des corrélations . . . . .	132
4.3.3	Analyse d'incertitude . . . . .	135
4.3.4	Analyse de sensibilité globale . . . . .	138
4.4	Conclusion . . . . .	143
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>145</b>
	<b>Annexes</b>	<b>149</b>



## Nomenclature

### Lettres latines

Notation	Unité	Signification
alb	[ - ]	albédo
Cp	[ kJ/(K.kg) ]	capacité calorifique
e	[ m ]	épaisseur
g	[ - ]	facteur solaire
h	[ m ]	hauteur
h <sub>c</sub>	[ W/(m <sup>2</sup> .K) ]	coefficient d'échange convectif
L	[ m ]	longueur
m	[ kg/s ]	débit massique
Q	[ m <sup>3</sup> /h ]	débit volumique
S	[ m <sup>2</sup> ]	surface
S <sub>i</sub>		indice de sensibilité
S <sub>Ti</sub>		indice de sensibilité total
S <sub>i,m</sub>		moyenne de l'indice de sensibilité réduit
S <sub>i,std</sub>		écart type de l'indice de sensibilité réduit
S <sub>i,d</sub>		distance de l'indice de sensibilité réduit
r		résidu
r <sub>i,j</sub>		degré de corrélation entre deux paramètres i et j
t		temps
T	[ (°C ou K) ]	température
U	[ m/s ]	vitesse
U	[ W/(m <sup>2</sup> .K) ]	coefficient de déperdition
V	[ m <sup>3</sup> ]	volume
w	[ m ]	largeur

## Lettres grecques

Notation	Unité	Signification
$\lambda$	[ W/(m.K) ]	conductivité thermique
$\lambda$	[ nm ]	longueur d'onde
$\eta$	[ - ]	efficacité
$\rho$	[ kg/m <sup>3</sup> ]	masse volumique
$\Phi$	[ W/m <sup>2</sup> ]	flux de chaleur
$\pm\Delta T$	[ °C ]	incertitude des températures d'air
$\mu_T$	[ °C ]	moyenne des températures d'air
$\sigma_T$	[ °C ]	écart type des températures d'air

## Indices

Notation	Signification
ext	extérieur
int	intérieur
an	air neuf
av	air vicié

## Autres notations et abréviations

Notation	Signification
CVC	chauffage ventilation climatisation
DJU	degrés jour unifié
Ext	extérieur
Int	intérieur
R	coefficient de détermination
RDC	rez-de-chaussée
SRC	coefficient de régression standardisés

---

## Table des figures

---

1.1	Tour Elithis à Dijon <i>photo DR (image fournie par Elithis)</i> . . . . .	3
1.2	Consommation et production de la tour Elithis (conception / occupation) (Source : A. Lenoir (2010) [35]) . . . . .	4
1.3	Besoins de chauffage, degrés jours unifiés et rayonnement direct moyen annuel pour les années de 1990 à 1999 et pour la référence de la maison I-DM du climat de Genève . . . . .	5
1.4	Besoins de chauffage, puissance maximale de chauffage et température d'air intérieur pour trois jours en été avec six outils de simulation appliqués au cas de la maison I-DM (Source : A. Brun et al (2009) [9]) . . . . .	9
1.5	Description de la méthode d'analyse de sensibilité globale . . . . .	22
1.6	Variation du besoin de chauffage en fonction de la valeur de l'efficacité de l'échangeur pour la maison I-DM . . . . .	24
1.7	Les trois techniques d'échantillonnage . . . . .	26
1.8	Les deux distributions utilisées : la distribution uniforme et la distribution normale . . . . .	27
2.1	La plate-forme INCAS . . . . .	32
2.2	Les trois maisons INCAS . . . . .	33
2.3	Plan du RDC et de l'étage de la maison expérimentale I-DM . . . . .	34
2.4	Liaison plancher bas mur extérieur de la maison I-DM . . . . .	35
2.5	Principaux matériaux utilisés dans l'enveloppe de la maison expérimentale I-DM . . . . .	35
2.6	Liaison plancher bas mur extérieur de la maison I-BB . . . . .	36
2.7	Principaux matériaux utilisés dans l'enveloppe de la maison expérimentale I-BB . . . . .	36
2.8	Site d'INES et positionnement des stations météo ( <i>photo : richard.balloide-photo.com</i> ) . . . . .	38
2.9	Les stations météo d'INES . . . . .	38
2.10	Mesure du rayonnement global pour le 11 et 12 mars 2011 à l'INES . . . . .	39
2.11	Rayonnement diffus mesuré et calculé à l'aide des deux pyranomètres disponible sur le site pour le 5 et 6 mars 2011 . . . . .	40

2.12	Mât dans la maison I-DM à l'étage se composant de 3 hauteurs différentes 0,10m, 1,10m et 1,70m du sol avec la température d'air et la vitesse d'air ainsi que la température de rayonnement à 1,10m du sol	42
2.13	Scénario du mois de février et de mars 2011 des maisons I-DM et I-BB	45
2.14	Température d'air et puissance des maisons I-DM et I-BB du 1er février au 31 mars	46
2.15	Température d'air et puissance de chauffage dans les maisons I-DM et I-BB, météo et scénario du 1 <sup>er</sup> au 5 février	47
2.16	Température d'air dans les maisons I-DM et I-BB et météo du 14 février au 3 mars	48
2.17	Gradient de température au RDC de la maison I-DM et conditions météorologiques pour 10 jours en février et 10 jours en mars	50
2.18	Différence de température journalière des maisons I-DM et I-BB pour le RDC et rayonnement direct journalier du 1 <sup>er</sup> février au 30 mars	52
2.19	Réseau de ventilation	53
2.20	Schéma de l'échangeur	53
2.21	Température d'air aux extrémités de l'échangeur pour le mois de février 2011	54
2.22	Efficacité de l'échangeur	55
2.23	Température d'air du réseau de ventilation pour le mois de février 2011	56
2.24	Mesure du débit pour la maison I-DM du 1 <sup>er</sup> au 4 mars	57
2.25	Mesure du débit pour la maison I-DM le 13 et 14 avril	57
2.26	Comparaison des mesures de débit par le balomètre et le débitmètre à ultrason	58
2.27	Positionnement des capteurs à une hauteur de 1,10m dans la maison I-DM	59
2.28	Température d'air sèche dans la maison I-DM pour le 12 février 2011	60
2.29	Température d'air sèche dans la maison I-DM pour le 15 février 2011	61
2.30	Température d'air sèche dans la maison I-DM pour le 25 mars 2011	62
2.31	Plage de température pour le niveau du RDC de la maison I-DM	64
3.1	Méthodologie de la validation expérimentale (extrait de Mara, 2000 [39])	69
3.2	EnergyPlus (extrait du manuel d'utilisateur d'EnergyPlus [4])	70
3.3	Maison expérimentale de la plateforme INCAS vue Sud et Ouest	73
3.4	Le système énergétique modélisé	76
3.5	Température d'air pour la première configuration et phase d'initialisation avec une consigne du chauffage de 19°C	79
3.6	Résultat de la température d'air pour la deuxième configuration et phase d'initialisation : en évolution libre	79
3.7	Comparaison de résultats de température d'air du RDC avec différentes valeurs de convergences	80
3.8	Résultat de simulation de la maison I-DM, température d'air RDC et étage et puissance de chauffage	82
3.9	Comparaison mesure simulation pour le rayonnement incident Est et Ouest pour le 17 et 18 février 2011	83

3.10	Comparaison entre la mesure et simulation pour la température d'air du vide-sanitaire et résidu . . . . .	84
3.11	Comparaison entre la mesure et la simulation pour la température d'air des combles . . . . .	85
3.12	Comparaison entre la mesure et la simulation pour la puissance journalière de chauffage pour la maison I-DM . . . . .	86
3.13	Comparaison entre la simulation et la mesure pour la moyenne et la variance journalière des températures d'air du RDC et de l'étage pour la maison I-DM . . . . .	87
3.14	Comparaison entre la simulation et une plage d'incertitude de la mesure de la température d'air du RDC et de l'étage, résidu du RDC et de l'étage et conditions météorologiques pour la maison I-DM du 11 au 17 février 2011 . . . . .	89
3.15	Comparaison entre la simulation et une plage d'incertitude de la mesure de la température d'air du RDC et de l'étage, résidu du RDC et de l'étage et conditions météorologiques pour la maison I-DM du 23 au 28 février 2011 . . . . .	90
3.16	Comparaison entre la simulation et une plage d'incertitude de la mesure de la température d'air du RDC et de l'étage, résidu du RDC et de l'étage et conditions météorologiques pour la maison I-DM du 23 au 28 mars 2011 . . . . .	91
3.17	Comparaison entre la mesure et la simulation pour la température d'air soufflée au RDC de la maison I-DM . . . . .	92
3.18	Comparaison entre la simulation et la mesure pour la moyenne et la variance journalière des températures d'air du RDC et de l'étage pour la maison I-BB . . . . .	93
3.19	Comparaison entre la mesure et la simulation pour la puissance journalière de chauffage pour la maison I-BB . . . . .	94
4.1	Enveloppe de la maison RT 2005 . . . . .	100
4.2	Scénario de dégagement des charges internes dues à l'électroménager .	101
4.3	Scénario d'occupation . . . . .	102
4.4	Résultats de simulations pour les 3 maisons étudiées : besoin de chauffage et nombre d'heure d'inconfort . . . . .	103
4.5	Température intérieure au RDC de la maison I-DM, température extérieure et charges internes dégagées au RDC du 20 au 28 juillet . . .	103
4.6	Étape pour obtenir les résultats de l'analyse de sensibilité locale . . .	105
4.7	Code couleur pour les paramètres pour l'analyse de sensibilité locale .	106
4.8	Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour le besoin de chauffage pour la maison I-DM . . . . .	106
4.9	Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour le besoin de chauffage pour la maison I-BB . . . . .	107
4.10	Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour le besoin de chauffage pour la maison RT2005 . . . . .	107
4.11	Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour le confort d'été pour le rez de chaussé pour la maison I-DM . . . . .	109



4.12	Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour le confort d'été pour le rez de chaussé pour la maison I-BB . . . . .	110
4.13	Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour le confort d'été pour le rez de chaussé pour la maison RT2005 . . . . .	110
4.14	Incertitude et échantillonnage des paramètres influents pour la maison I-DM . . . . .	114
4.15	Étape pour obtenir les résultats de l'analyse d'incertitude . . . . .	117
4.16	Résultats des moyennes du besoin de chauffage et des incertitudes pour 2000 simulations pour les 3 maisons étudiées . . . . .	118
4.17	Histogramme des besoins de chauffage pour les trois maisons pour 2000 simulations . . . . .	119
4.18	Étape pour obtenir les résultats de l'analyse de sensibilité globale . .	121
4.19	Résultat de l'analyse de sensibilité globale pour le besoin de chauffage pour la maison I-DM . . . . .	122
4.20	Résultat de l'analyse de sensibilité globale pour le besoin de chauffage pour la maison I-BB . . . . .	122
4.21	Résultat de l'analyse de sensibilité globale pour le besoin de chauffage pour la maison RT 2005 . . . . .	123
4.22	Résultat de l'analyse de sensibilité globale pour le besoin de chauffage pour la maison I-BB en considérant neuf paramètres influents . . . .	126
4.23	Résultat de simulation de la température d'air du RDC de la maison I-DM, la température extérieur et le rayonnement direct pour les deux périodes étudiées . . . . .	128
4.24	Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour la maison I-DM pour la température d'air du RDC et de l'étage du 5 au 24 février 2011 . .	130
4.25	Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour la maison I-DM pour la température d'air du RDC du 20 au 30 mars 2011 . . . . .	131
4.26	Valeur des degrés de corrélation entre les paramètres . . . . .	133
4.27	Incertitude et échantillonnage des paramètres influents pour la maison I-DM pour le scénario réel . . . . .	136
4.28	Comparaison de l'analyse d'incertitude pour la maison I-DM pour la température d'air du RDC et de l'étage du 5 au 24 février 2011 . . .	137
4.29	Indices de sensibilité globale du premier ordre et total pour la température d'air du RDC de la maison I-DM du 5 au 25 février 2011 . .	140
4.30	Indices de sensibilité globale du premier ordre et total par paramètre pour la température d'air du RDC de la maison I-DM du 5 au 25 février 2011 . . . . .	141
4.31	Indices de sensibilité du premier ordre pour la température d'air du RDC et de l'étage de la maison I-DM du 5 au 25 février 2011 . . . . .	142
32	Façades des maisons expérimentales . . . . .	149
33	Coupe de principe de la maison I-DM . . . . .	150
34	Plan du RDC de la maison I-DM . . . . .	151
35	Plan de l'étage de la maison I-DM . . . . .	151
36	Coupe de principe de la maison I-BB . . . . .	152
37	Plan du RDC de la maison I-BB . . . . .	153

38	Plan de l'étage de la maison I-BB . . . . .	153
39	Modèle numérique de la double flux utilisé dans EnergyPlus . . . . .	164



---

## Liste des tableaux

---

1.1	Valeur des coefficients d'échange convectifs pour les deux configurations [W/m <sup>2</sup> .K] (Source : A. Brun et al (2009) [9]) . . . . .	8
2.1	Mesure du débit par le balomètre effectuée le 2 février . . . . .	58
2.2	Valeur des écarts de température entre tous les capteurs par niveau, amplitude des températures par niveau, écart moyen entre les niveaux et moyenne de température extérieure et rayonnement direct pour le 12 février, le 15 février et le 25 mars . . . . .	63
3.1	Valeur du test d'étanchéité . . . . .	75
4.1	Tableau des charges internes dues à l'électroménager . . . . .	100
4.2	Tableau des charges internes dues aux occupants . . . . .	101
4.3	Tableau des paramètres et plage de variation pour la maison I-DM . .	113
4.4	Tableau des paramètres et plage de variation pour la maison I-BB . .	115
4.5	Tableau des paramètres et plage de variation pour la maison RT 2005	116
4.6	Analyse des corrélations triées par ordre d'importance pour la température d'air du RDC . . . . .	134
4.7	Tableau des paramètres et plage de variation pour la maison I-DM pour le scénario réel . . . . .	138
8	Propriétés thermo-physique des matériaux de constructions des parois opaques des maisons I-DM et I-BB . . . . .	154
9	Coefficient de transmission thermique des parois des maisons I-DM et I-BB . . . . .	155
10	Propriétés de surface des parois opaques des maisons I-DM et I-BB .	155
11	Propriétés des vitrages utilisés des maisons I-DM, I-BB et RT 2005 .	156
12	Propriétés physique des fenêtres double vitrage des maisons I-DM, I-BB et RT 2005 . . . . .	156
13	Propriétés des fenêtres triple vitrage des maisons I-DM et I-BB . . .	157
14	Propriétés des gaz des fenêtres double et triple vitrage des maisons I-DM, I-BB et RT 2005 . . . . .	157

15	Propriétés des cadres des maisons I-DM, I-BB et RT 2005 . . . . .	157
16	Propriétés des volets roulants des maisons I-DM, I-BB et RT 2005 . .	158
17	Dimension des ouvertures comprenant vitrage+cadre des maisons I-DM, I-BB et RT 2005 . . . . .	158
18	Propriétés thermo-physique des matériaux de constructions des parois opaques de la maison RT 2005 . . . . .	159
19	Coefficient de transmission thermique des parois de la maison RT 2005	159
20	Les douze premières lignes du fichier météo d'EnergyPlus pour Chambéry/Aix les Bains . . . . .	160
21	Description des colonnes 1 à 25 des fichiers météo d'EnergyPlus . . .	162
22	Description des colonnes 26 à 35 des fichiers météo d'EnergyPlus . . .	163

---

## Introduction

---

La maîtrise des consommations est devenue, au cours des dernières années, un enjeu économique majeur et les politiciens inscrivent la transition énergétique au coeur de leur programme présidentiel. En France le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie représentant 44% de l'énergie finale totale et 23% d'émission de gaz à effet de serre<sup>1</sup>. Le Grenelle de l'environnement<sup>2</sup> fixe les objectifs de division par quatre des émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050, pour stabiliser les émissions au niveau de 1990. Pour tenir ces objectifs, la construction de bâtiments à basse consommation se généralise et un programme de rénovation du parc existant est en cours. De nombreux projets s'intéressent à vérifier que les performances énergétiques réelles sont bien en adéquation avec les objectifs fixés dans le projet et avec les prescriptions faites lors de la conception. On parle alors de garantie de performance. Or par retour d'expérience il est souvent constaté des écarts entre consommation estimée et mesurée. Ces exigences en termes de consommation énergétique et de garantie de performance vont rendre la construction plus délicate et accentuer l'importance de la phase de conception. Ainsi le recours à la simulation lors de la conception de bâtiments neufs ou la réhabilitation de bâtiments existants va devenir indispensable pour prévoir leurs consommations énergétiques.

Par ailleurs les exigences de précision des calculs sont accrues et il devient essentiel d'apprécier les incertitudes associées à ces prévisions afin d'améliorer le processus de conception. De plus savoir évaluer les incertitudes de mesure est indispensable pour permettre un diagnostic énergétique précis. Dans ce manuscrit, nous avons exploité la plateforme expérimentale INCAS située à l'INES au Bourget du Lac pour identifier les incertitudes de mesure mais aussi les incertitudes dont les hypothèses de modélisation font l'objet. Puis une méthodologie a été proposée permettant d'identifier les paramètres de conception les plus influents sur la performance énergétique d'un bâtiment et de rendre compte des effets de l'incertitude associée à ces paramètres sur cette même performance.

Le premier chapitre met en avant la question de la fiabilité des outils de simulation. Un nombre important d'outils de simulation permet d'améliorer les performances énergétiques des bâtiments que ce soit en phase de conception ou de réhabilita-

---

1. Données provenant du rapport de l'ADEME «Chiffres Clés du Bâtiment Edition 2010»  
2. <http://www.plan-batiment.legrenelle-environnement.fr/>

tion. Ces outils ont des domaines d'applications très différents. Une présentation des outils les plus utilisés est proposée ainsi que les hypothèses de simulation correspondant qui ne sont pas toujours en adéquation avec les constructions d'aujourd'hui.

Le second chapitre traite des incertitudes de mesure que l'on peut rencontrer dans un bâtiment à faible consommation d'énergie. Une présentation de la plateforme INCAS est réalisée ainsi qu'une description détaillée des maisons I-DM et I-BB. On présente l'ensemble des capteurs installés sur le site d'INES permettant de suivre le comportement thermique des maisons ainsi que leurs plages d'incertitude. Une période a été analysée pour identifier la plage d'incertitude de plusieurs paramètres.

Les mesures effectuées sur le site d'INES permettent d'effectuer une validation des modèles numériques des maisons, c'est l'objet du troisième chapitre. EnergyPlus est l'outil de simulation choisi pour ces travaux et on présente les nombreuses validations dont il a fait l'objet. Enfin une comparaison entre l'expérimentation et la simulation pour le cas des maisons I-DM et I-BB montre toute la difficulté de cette étape de validation.

Le dernier chapitre propose une méthodologie basée en trois temps pour évaluer les incertitudes associées aux prévisions notamment des besoins en chauffage et la température d'air. La première étape consiste à identifier parmi l'ensemble des paramètres du modèle ceux qui ont une influence prépondérante sur le résultat.

# CHAPITRE 1

---

## Le monde incertain de la simulation du bâtiment

---

*Ce chapitre présente différentes sources d'incertitude de la simulation thermique dynamique des bâtiments à faible consommation. La fiabilité des outils décrivant ce type de bâtiments est continuellement remise en question. Nous verrons que les résultats de simulation sont soumis à de nombreuses incertitudes qu'il est important de considérer dans les études. Plusieurs outils seront présentés, qui permettent d'effectuer des simulations de différents niveaux de finesse. Les analyses de sensibilité présentées sont des méthodes qui permettent d'observer la contribution des paramètres d'entrées d'un modèle à la variation des sorties des simulations.*



## 1.1 Les enjeux de l'utilisation de la simulation thermique dynamique

La simulation numérique utilisée dans de nombreux domaines de recherche et développement comme la mécanique, l'astrophysique, la physique nucléaire, l'aéronautique, la météorologie... est un outil permettant de simuler des phénomènes réels. Il est possible de simuler des phénomènes physiques complexes comme par exemple la prévision des changements climatiques, ou encore de tester les performances d'un avion, d'une voiture, d'un bateau ou d'un bâtiment. La simulation sert à étudier le fonctionnement et les propriétés du système modélisé ainsi qu'à prévoir son évolution.

L'utilisation d'outils de simulation est décisive dans le processus de conception aussi bien pour des constructions neuves qu'en rénovation. Dans sa thèse P. Tittlein [61] effectue un état de l'art sur l'analyse de cycle de vie des bâtiments, il en conclut que pour réduire l'impact environnemental d'un bâtiment, il est nécessaire de réduire ses consommations énergétiques. A l'aide de modèles détaillés et précis, la simulation thermique dynamique permet d'obtenir les températures d'air et les températures opératives dans les locaux permettant d'évaluer le confort de l'occupant. Chaque projet étant un prototype, la simulation doit permettre de déterminer les meilleures solutions technologiques mais aussi évaluer le potentiel de nouveaux systèmes. Un exemple est la réduction du besoin de chauffage par optimisation des dimensions des vitrages grâce à la simulation numérique dans le cas de la conception des maisons INCAS au Bourget du Lac car la simulation numérique a permis d'évaluer différentes alternatives au regard de la performance énergétique et du confort des occupants constituant ainsi un outil d'aide à la décision incontournable. Dans la démarche d'une garantie de performance énergétique la simulation numérique offre des perspectives que l'on va tenter de préciser.

## 1.2 La problématique de la garantie de performance

Dans le contexte de la construction de bâtiments neufs à très faible consommation voire autonomes en énergie, il devient impératif de mettre en place une pratique systématique du suivi du bâtiment nouvellement construit. On parle de garantie de performance lorsqu'on veut vérifier que les performances réelles d'un bâtiment sont bien en adéquation avec les objectifs fixés dans le projet et avec les prescriptions faites lors de la conception. On peut définir une garantie de résultat où la performance énergétique du bâtiment doit être comprise comme un contrat entre les acteurs qui fixent une consommation énergétique surfacique annuelle à atteindre.

Un exemple concerne la Tour Elithis inaugurée en 2009 à Dijon, immeuble de 5000 m<sup>2</sup> de bureaux et commerces, annoncée comme le premier bâtiment tertiaire français à « énergie positive » (figure 1.1). Les prévisions avaient donné un ratio énergétique de 65 kWhEP/(m<sup>2</sup>.an) et après une année d'utilisation du bâtiment, un premier



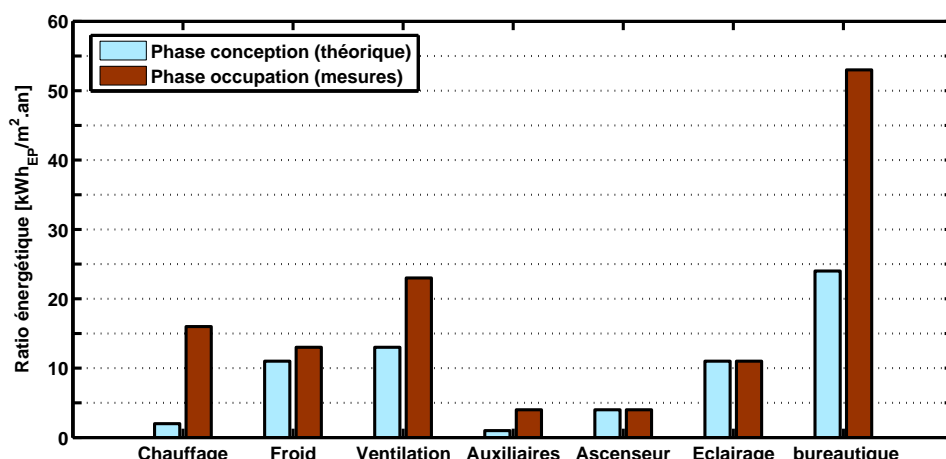
**Figure 1.1** – Tour Elithis à Dijon *photo DR (image fournie par Elithis)*

bilan énergétique a été effectué. Les mesures effectuées sur les 12 premiers mois d'exploitation (8 de mesures, 4 extrapolés et ramenés à un taux d'occupation de 100%) donnent un ratio de 96 kWhEP/(m<sup>2</sup>.an).

La figure 1.2 établit la comparaison entre les phases d'études et l'occupation pour le cas de la tour Elithis. On constate des écarts importants entre les prévisions et les mesures dans le cas de la consommation de chauffage, de ventilation et de bureautique. Cet exemple illustre toute la difficulté de prévision des consommations réelles à partir de consommations issues de scénarios conventionnels, car il est difficile de fixer une valeur de consommation énergétique compte tenu des aléas possibles durant les différentes phases du cycle de vie bâtiment. Trois phases se distinguent pour obtenir les résultats de la figure 1.2 :

- la phase de conception
- la phase de mise en oeuvre
- la phase d'exploitation

**Phase de conception :** durant cette phase, des simulations sont effectuées pour déterminer une consommation énergétique. On essaie de prévoir l'occupation du bâtiment qui est une donnée incertaine tout comme le comportement de ses occupants. Dans le secteur du logement selon qu'une personne est seule, en couple avec enfants ou retraités, le taux d'occupation de l'appartement sera différent avec une répercussion sur les consommations énergétiques. De plus, le profil (propriétaire ou locataire) pourra varier tout au long de la durée de vie du bâtiment. Une autre variabilité possible sur la prévision des consommations réelles qu'on va regarder maintenant plus en détail est le choix du fichier des données climatiques. L'emploi d'outils de simulation dynamiques requiert l'utilisation de sollicitations climatiques en entrée du modèle obtenues à partir des données météorologiques horaires de la station la plus proche



**Figure 1.2** – Consommation et production de la tour Elithis (conception / occupation) (Source : A. Lenoir (2010) [35])

du bâtiment nouvellement construit.

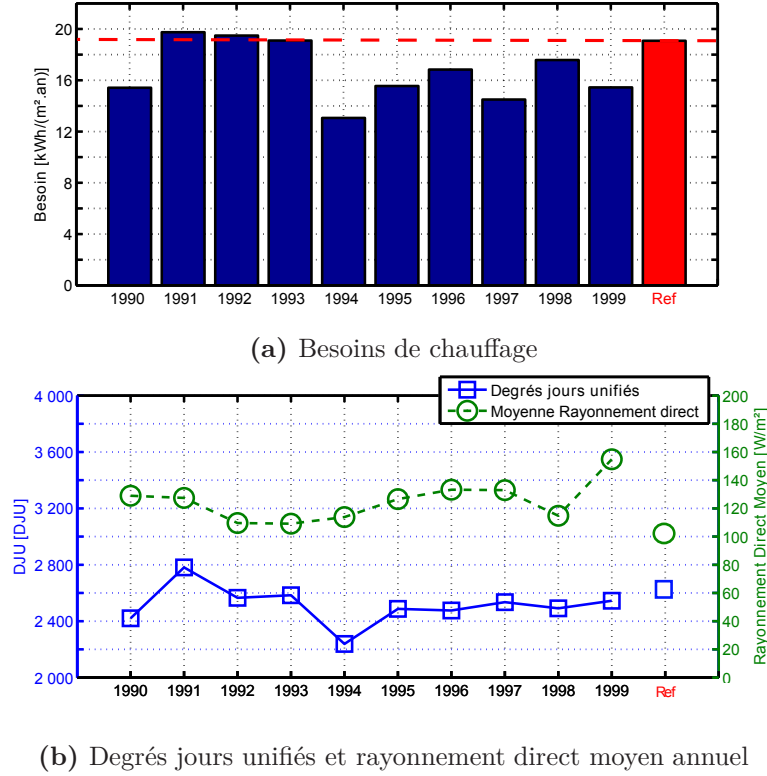
L'outil le plus connu en Europe fournissant des données climatiques est Meteonorm. Il contient les bases de données météorologiques de plus de 7700 stations et des algorithmes permettant de créer, à partir des valeurs mesurées, des fichiers météo de n'importe quel endroit sur le globe. Pour l'outil de simulation EnergyPlus, les fichiers météo sont disponibles librement sur le site Internet du département de l'énergie des États-Unis<sup>1</sup>, ces données provenant de l'organisation météorologique mondiale<sup>2</sup>. Un seul fichier est généralement fourni par ville représentatif du climat de la ville de ces dernières années alors que la météo est soumise à différents aléas en fonction des années et des saisons.

L'office fédéral de météorologie et de climatologie Météo Suisse fournit des données météorologiques mesurées pour différents sites et pour différentes années. Pour présenter les disparités de résultats de consommation énergétique d'un bâtiment entre différentes années, nous avons modélisé une maison à faible consommation énergétique, la maison INCAS double mur dite maison I-DM avec l'outil EnergyPlus avec différents fichiers météo fournis par météo Suisse, les fichiers météo annuels étant les données mesurées à Genève pour les années 1990 à 1999. D'autre part, nous avons effectué la simulation avec le fichier météo fourni par le département de l'énergie pour la même ville qu'on appellera fichier de référence et nous avons déterminé les besoins de chauffage pour la maison I-DM pour chaque fichier météo ainsi que les degrés jour unifiés (DJU) et la moyenne du rayonnement direct annuel.

Les DJU qui permettent de connaître la rigueur de l'hiver sont déterminés pour la période du 1<sup>er</sup> octobre au 20 mai. Le  $DJU_{journalier}$  est déterminé selon l'équation 1.1

1. [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_about.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm)

2. [http://www.wmo.int/pages/index\\_fr.html](http://www.wmo.int/pages/index_fr.html)



**Figure 1.3** – Besoins de chauffage, degrés jours unifiés et rayonnement direct moyen annuel pour les années de 1990 à 1999 et pour la référence de la maison I-DM du climat de Genève

et les DJU correspond à la somme des  $DJU_{journalier}$  :

$$DJU_{journalier} = 18 - \frac{T_{min} + T_{max}}{2} \quad (1.1)$$

La figure 1.3 représente les résultats de la modélisation de la maison I-DM pour les besoins de chauffage de différentes années de 1990 à 1999 ainsi que le cas de référence du climat de Genève ainsi que les DJU et le rayonnement direct moyen annuel. En fonction du fichier météo utilisé, les résultats des besoins de chauffage sont compris entre 12 et 20 kWh/(m².an) et on observe jusqu'à 30% d'écart entre l'année 1994 et le cas de référence. On constate des écarts similaires en ce qui concerne les DJU et la moyenne du rayonnement direct.

La prévision énergétique d'un bâtiment demande l'utilisation d'un fichier météo, mais ces données sont sources d'incertitudes. La météo évoluant quotidiennement, le résultat prédit lors de la simulation sera différent en fonction du moment d'exploitation du bâtiment. On va détailler maintenant, d'autres sources d'incertitudes qui peuvent également impacter la garantie de performance d'un bâtiment lors des différentes phases de sa construction.

**Phase de mise en oeuvre :** différentes sources d'erreurs peuvent être responsables de biais sur les résultats de la performance énergétique. Les caractéristiques physiques des matériaux choisis durant la phase de conception pour la modélisation peuvent être différentes des caractéristiques physiques des matériaux réellement installés impliquant une modification du résultat de simulation. Une mauvaise mise en oeuvre peut également impliquer des ponts thermiques induisant une performance énergétique dégradée.

**Phase d'exploitation :** durant cette phase, une instrumentation appropriée peut être mise en place pour vérifier le bon fonctionnement du bâtiment. Dans le cas des systèmes énergétiques, on appelle cela le commissionnement. L'annexe 40 de l'Agence Internationale de l'Énergie l'a défini comme un processus visant à s'assurer que les systèmes sont conçus, installés, testés, fonctionnels et peuvent être exploités et maintenus dans des conditions optimales. Il commence avec le programme et se poursuit au cours des phases de conception, de construction, de réception, de formation et d'exploitation et peut être appliqué tout au long de la vie du bâtiment.

M.A. Piette et al (2001) [53] ont effectué une opération de commissionnement sur un bâtiment à San Fransisco (USA). Ils ont développé un outil qui permet d'effectuer la phase d'acquisition des données, la phase de traitement des données et la phase de visualisation. A l'aide de cette étude, ils ont amélioré les opérations de contrôle des systèmes énergétiques en les rendant plus autonomes d'où une réduction de la consommation énergétique et donc économique. En pilotant l'ensemble des équipements techniques et électroniques d'un bâtiment tertiaire, la gestion technique du bâtiment (GTB) permet de réaliser des économies d'énergie, tout en optimisant le confort des occupants.

Le commissionnement est en train de se développer principalement pour des raisons environnementales et énergétiques, il permet de vérifier le bon fonctionnement du bâtiment. Dans l'étude de M.A. Piette et al (2001) [53], on parle d'amélioration et non de garantie de performance énergétique.

Nous venons de décrire les incertitudes durant les différentes phases de la construction d'un bâtiment. Dans le cas de la tour Elithis, différentes sources d'incertitudes peuvent être à l'origine des écarts entre les prévisions et les mesures. A partir de quels scénarios ont été calculées les prévisions ? Sont-ils réalistes ? La mise en oeuvre a-t-elle été suffisamment respectée par rapport aux prévisions ? Les mesures effectuées sur le site sont elles fiables ? Voici le type de questions auxquelles on va tenter de répondre dans ce travail.

De nombreuses incertitudes peuvent influencer les performances énergétiques durant la phase de construction d'un bâtiment. Les travaux de cette thèse portent en particulier sur l'évaluation et la hiérarchisation des incertitudes sur les résultats des simulations en phase de conception. Nous avons utilisé la plateforme expérimentale INCAS située à INES au Bourget du Lac pour identifier les incertitudes de mesure mais aussi les incertitudes dont les hypothèses de modélisation font l'objet. On a

ensuite évalué la fiabilité des codes de simulation utilisés pour la conception. Enfin on propose une méthodologie pour identifier les paramètres de conception les plus influents sur la performance énergétique d'un bâtiment et pour rendre compte des effets de l'incertitude associée à ces paramètres sur cette même performance.

La première question posée concerne la fiabilité des outils de simulation couramment utilisés.

### 1.3 La problématique de la fiabilité des outils de simulation

#### 1.3.1 Identification et caractérisation des sources potentielles de biais et d'incertitude

Au cours du processus de modélisation plusieurs étapes sont nécessaires pour obtenir un résultat. L'objet technologique est remplacé par un modèle théorique, puis mathématique, ensuite numérique et enfin algorithmique/informatique. Lors de ces transformations, de nombreuses simplifications, approximations, hypothèses sont faites et ces choix peuvent engendrer des biais dans le modèle.

Ceux qui proviennent des mondes mathématique, numérique et algorithmique sont souvent bien maîtrisés et faciles à déceler, à évaluer et à corriger. Par contre, les simplifications qui s'opèrent à l'intérieur des mondes technologiques (ex. : simplification de la géométrie, zonage) et physiques (phénomènes négligés, simplification des lois de transferts, descriptions empiriques) qui induisent souvent les biais les plus importants, posent des problèmes d'identification et d'évaluation.

Pour ce qui est des incertitudes, il convient de séparer celles qui sont associées à des mesures, à caractère aléatoire et facilement évaluables, de celles qui reflètent une connaissance imparfaite ou incomplète de l'objet et dont l'appréciation ne peut être que de nature subjective. Ces dernières peuvent apparaître au niveau des paramètres invariables au cours de la simulation (ex. : propriétés physiques des matériaux, coefficients d'échange, etc.), des conditions aux limites et des sollicitations météorologiques, des charges internes, du comportement des usagers et de la gestion...

#### 1.3.2 Les outils de simulation sont-ils fiables ?

De nombreux outils de simulation sont proposés aux acteurs du bâtiment : Trnsys, EnergyPlus, Comfie+Pléiades... Tous ces outils ont montré leurs performances et ont fait l'objet de validations poussées. Les projets PASSYS et BESTEST sont les projets les plus emblématiques s'étant intéressés à la validation des outils de simulation appliqués à la thermique des bâtiments. Le projet européen PASSYS a été proposé en 1986 par la commission européenne avec comme but d'augmenter la fiabilité des systèmes solaires passifs et il s'est intéressé à valider les codes de simulation [32].

	Plancher Bas		Paroi Verticale		Paroi Vitrée		Plancher Intermédiaire		Plancher Haut	
	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int	Ext
Simu 1	1.8	3.3	3.3	14.9	3.3	14.9	3	3	4.6	18.9
Simu 2	1.0	1.3	1.1	5.6	1.9	3.6	1.0	0.9	1.0	2.4

**Table 1.1** – Valeur des coefficients d'échange convectifs pour les deux configurations [W/m<sup>2</sup>.K] (Source : A. Brun et al (2009) [9])

L'un des axes de ce programme a consisté à réaliser des cellules test dans plusieurs pays, comme moyen d'évaluation standardisé des "composants d'apport solaire passif". Les cellules PASSYS sont composées de cinq faces considérées adiabatiques, la façade test (orientée Sud) étant modulable et ont permis d'effectuer une validation expérimentale des codes. Les travaux du projet BESTEST [48],[49] qui signifie "building energy simulation test" a consisté à mettre en place une procédure qui permet de comparer les résultats des outils de simulation avec des cas tests en comparant différents modes constructifs comme les bâtiments à forte inertie par rapport aux bâtiments à faible inertie permettant de tester et de comparer entre eux les outils numériques. Ces travaux ont été développés dans le cadre de la tâche 12, qui impliquaient une coopération entre les membres de l'agence internationale d'énergie (IEA), du programme «chauffage et rafraîchissement solaire des bâtiments» pilotée par le NREL<sup>3</sup>.

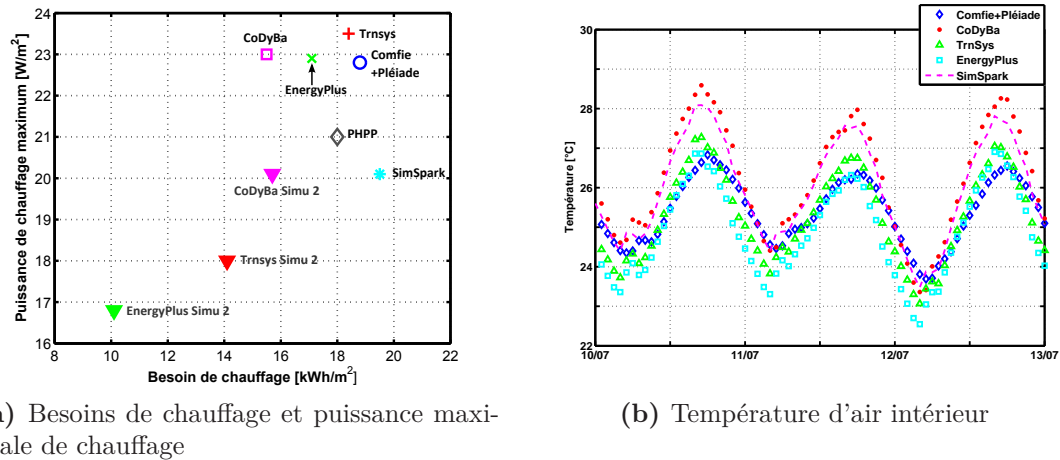
Malgré les différents projets de validation, des écarts importants entre les résultats de simulations peuvent être constatés entre les outils. Une étude a été réalisée par A. Brun et al (2009) [9] sur la comparaison de différents outils de simulation (PHPP, Comfie+Pléiade, CoDyBa, Trnsys, EnergyPlus et SimSpark) appliqués au cas de la maison I-DM situé à l'INES (73). Deux configurations ont été testées, dans le premier cas les coefficients d'échanges convectifs sont constants et égaux, imposés par Pléiade et dans un second temps des valeurs annuelles moyennes ont été utilisées pour les coefficients d'échanges convectifs dans le cas de trois outils, EnergyPlus, Trnsys et CoDyBa. Le tableau 1.1 récapitule les coefficients considérés pour les deux configurations.

La figure 1.4a montre la concordance entre les différents résultats quelques soient les outils utilisés pour le cas de la simulation 1 pour le besoin de chauffage. Alors que pour la simulation 2, l'utilisation de différentes méthodes d'évaluation des coefficients de convection s'est traduite par une variation par rapport au cas de base allant jusqu'à 60% sur les besoins de chauffage pour le cas d'EnergyPlus, en valeur absolue cela correspond à moins de 10kWh/m<sup>2</sup>. La moyenne de besoin de chauffage du parc existant est d'environ 200kWh/m<sup>2</sup>. On peut en conclure que dans le cas des bâtiments très isolés des paramètres prennent de l'importance qu'ils n'avaient pas dans le cas de bâtiments énergétivore. Mieux comprendre la cause de ces écarts et tenter de les réduire est important pour rendre la simulation opérationnelle au-

---

3. NREL : National Renewable Energy Laboratory





**Figure 1.4** – Besoins de chauffage, puissance maximale de chauffage et température d'air intérieur pour trois jours en été avec six outils de simulation appliqués au cas de la maison I-DM (Source : A. Brun et al (2009) [9])

près des professionnels de la construction. Nous devons être capable de valider ces résultats notamment en quantifiant leurs incertitudes, d'où l'importance de disposer d'outils fiables au niveau des modèles et des algorithmes de résolution. Bien que cette préoccupation de validité ne soit pas nouvelle, elle se pose aujourd'hui de façon importante par rapport aux bâtiments à basse, voire très basse consommation. En effet, un certain nombre d'hypothèses de modélisation généralement admises pour des bâtiments standards pourraient faire défaut du fait de la prépondérance nouvelle de phénomènes physiques jusqu'à présent négligés ou mal pris en compte, aussi bien au niveau de l'enveloppe que de l'ambiance intérieure.

#### 1.3.3 Les incertitudes dans la modélisation des bâtiments à faible consommation énergétique

T. Duforestel (2008) et al. [22] dressent un large aperçu des hypothèses de modélisation qui ne sont plus en adéquation avec l'augmentation des performances des bâtiments. On va développer dans cette partie les exemples suivants :

- l'utilisation du pas de temps horaire
- le positionnement de la station météo
- la simulation de la tache solaire
- la simulation de la ventilation naturelle
- l'estimation du confort thermique dans un bâtiment naturellement ventilé
- l'estimation des charges internes et le comportement des occupants
- la durée de vie des matériaux



Le choix du pas de temps de simulation qui est horaire en général est important. Dans les bâtiments à basse consommation, les grandes ouvertures sur l'extérieur et l'énergie solaire contribuent à la modification du comportement thermique des bâtiments. Les données horaires pour le rayonnement ne permettent pas de représenter correctement le lever et le coucher du soleil et lissent les perturbations en cours de journée induisant des biais dans les résultats de simulation dans le cas de bâtiments à faible consommation d'énergie.

La localisation de la station météo est également importante et elle doit être suffisamment proche du bâtiment simulé pour ne pas engendrer d'incertitude. Krügera et al. (2008) [34] montrent dans une étude l'influence des résultats de simulation avec des données météo du site voisin. Une étude<sup>4</sup> effectuée par le bureau d'étude Enertech montre l'évaluation par la mesure des performances énergétiques des bâtiments construits dans le projet de la ZAC de Bonne à Grenoble. Les prévisions des consommations ont été faites avec des données météo issues des stations situées hors de la ville. De grosses différences sont constatées entre les mesures in situ et la station hors de la ville, la ville ayant des températures annuelles moyennes plus élevées de 2°C dues à l'îlot de chaleur. Cela a pour conséquence une surestimation des consommations de chauffage lors des simulations pouvant atteindre 30%.

Les bâtiments sont conçus pour les occupants et il est important de ne pas négliger le confort thermique par rapport à l'efficacité énergétique du bâtiment ni l'influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique. Lors de la conception des bâtiments, les scénarios d'occupation et de dégagement de chaleur des appareils électriques sont estimés. Après construction, des écarts de consommation sont identifiés entre la prévision et la réalité. Ces écarts peuvent être dus essentiellement au scénario considéré lors de la phase de conception. Un exemple est l'augmentation de la consigne de chauffage de 1°C qui a comme impact une augmentation des besoins de chauffage de 12 à 18% dans le cas de bâtiments très isolés (note n° 4).

La modélisation du confort thermique est un sujet complexe en regard de l'évaluation du confort thermique. Le confort thermique est un état d'équilibre entre le corps et son environnement mais la sensation de confort thermique est très subjective et dépend de l'individu (âge, sexe, situation géographique..) et de son activité (état de repos, sport, travail..). Il dépend de paramètres comme la température d'air et des surfaces environnantes, de la vitesse d'air, de l'humidité. Cette notion étant propre à chaque individu et fonction de sa sensibilité, son niveau d'habillement, son taux d'activité et fait l'objet de nombreux projets de recherche portant sur le confort de l'occupant [43], [47]. Des études plus récentes ont porté sur l'approche adaptative du confort consistant à prendre en compte les interactions entre l'occupant et son environnement et Brager et al (1998) [6] et Haldi et al (2008) [26] nous proposent un état des lieux sur l'adaptation du confort thermique dans les bâtiments. Malgré un nombre conséquent de projets de recherche s'intéressant au confort thermique de l'occupant, la modélisation de celui ci reste complexe et source d'incertitude et

---

4. rapport du cabinet Enerthec «Evaluation par mesure des performances énergétiques des 8 bâtiments de la Zac de Bonne à Grenoble - SYNTHÈSE»

constitue un verrou primordial dans la conception optimale d'un bâtiment.

Les principales caractéristiques architecturales d'un bâtiment sont définies très tôt dans le projet comme par exemple la superficie des ouvrants et les outils de simulation permettent de modéliser les apports passifs dus en grande partie au rayonnement solaire direct et diffus. Ce rayonnement entrant par une fenêtre est souvent pris en compte dans les logiciels de façon simplifiée. De nombreux modèles existent [61] mais ils comportent tous des approximations sujettes aux incertitudes.

Le dimensionnement des ouvrants nécessaires dans les façades en fonction du potentiel disponible en tirage thermique et en vent afin d'éviter les risques de surchauffe en période estivale est effectué en phase d'avant projet. De nombreux travaux de recherche portent sur ce sujet et la thèse de L. Stephan (2010)[58] dont le sujet est la "Modélisation de la Ventilation Naturelle pour l'Optimisation du Rafraîchissement Passif des Bâtiments", expose différentes méthodes de calculs pour modéliser la ventilation naturelle par des outils d'aide à la décision mais aussi par des outils plus précis permettant de réaliser des simulations fines du comportement aérodynamique du bâtiment. Malheureusement ce type de simulation n'est pas adapté aux travaux des bureaux d'études car même avec des temps de calcul très élevés, les résultats manquent toujours de fiabilité.

Le vieillissement des composants et notamment de nouveaux composants à très haute efficacité énergétique est rarement déterminé correctement au moment de la fabrication. Un exemple en est celui des fenêtres intégrant une lame d'argon entre deux vitrages dont l'étanchéité de l'espace n'est pas connue or en l'absence de ce gaz, l'efficacité du vitrage diminue ainsi que la performance du bâtiment induisant un écart sur la consommation énergétique du bâtiment.

La conception de bâtiments à faible consommation énergétique demande d'améliorer ou de mettre en place de nouveaux outils. Les paragraphes précédents se sont intéressés à lister les hypothèses de modélisation qui induisent de nombreuses biais et incertitudes sur les résultats dans le cas de bâtiment à faible consommation. Mais de nombreuses autres sources d'incertitudes existent et ne sont pas décrites ici comme :

- la modélisation du rayonnement et la prise en compte de la tache solaire
- le découpage en zone thermique
- les effets du vent
- la présence de l'humidité dans les matériaux et dans l'air

Pour la modélisation de bâtiments à faible consommation énergétique plusieurs centaines d'outils existent. Chaque outil ne répond pas aux mêmes besoins avec la même précision, le paragraphe suivant s'intéressera à classer les outils en différentes catégories en fonction de leur pertinence.

### 1.3.4 Les outils de simulation et bâtiment à faible consommation énergétique

Ces dernières décennies, plusieurs centaines d'outils de simulation du comportement énergétique des bâtiments ont été développés à travers le monde. Le répertoire des outils élaboré par le Ministère de l'Énergie des États-Unis<sup>5</sup> est là pour l'attester : 398 outils liés à l'évaluation de l'efficacité énergétique, aux énergies renouvelables ou au développement durable des bâtiments y sont recensés. Les principaux objectifs de ces outils sont de proposer et justifier une disposition architecturale, un type de matériau ou une stratégie de ventilation optimisant le confort et diminuant les consommations d'énergie.

Ces outils peuvent prendre des formes diverses : bases de données, feuilles de calcul, outils d'analyse de composants ou de systèmes et logiciels de simulation des performances énergétique de bâtiments dans leur ensemble. Dans cette partie, il ne s'agit pas d'être exhaustif dans la présentation des différents codes de simulation, le lecteur pouvant se reporter à la présentation de chaque outil, mais de différencier les objectifs et les niveaux de précision de chacun de ces outils dont la pertinence dépend de l'usage et du besoin de l'utilisateur. L'utilisation d'un outil dont le système énergétique pourrait être modélisé très finement ne sera pas adapté pour une phase d'avant projet qui consiste à obtenir une tendance de la performance énergétique. Par contre dans le cas de la vérification de fonctionnement d'un système énergétique qui a fait l'objet d'une instrumentation poussée un outil comme le langage Modelica est adapté et permettra de comparer les résultats de modélisation du moindre composant du système avec les résultats de mesure.

On présentera les outils les plus utilisées en France, dans le monde et aussi ceux ayant un fort développement possible dans les prochaines années. Les outils sélectionnés selon ces critères sont :

- leur utilisation au niveau national : Comfie, ArchiWizard, CoDyBa et Spark
- leur utilisation au niveau international : PHPP, EnergyPlus, Virtual environment, Trnsys, Esp-r, Matlab/Simulink
- leur fort développement possible : le langage Modelica avec l'outil Dymola

#### 1.3.4.1 Outils utilisés au niveau national

**ArchiWizard**<sup>6</sup> a été développé grâce au rapprochement technologique des sociétés HPC-SA et TBC dans le cadre du Grenelle de l'environnement, de la problématique du Bâtiment Économe et de la RT 2012 qui tracent la voie vers des bâtiments à énergie positive. Il permet le calcul des besoins énergétiques mais aussi des besoins d'éclairage. Son module de calcul est basé sur le lancer de rayon. Il intègre un module de calcul RT2012 permettant de vérifier la conformité réglementaire. Il s'appuie sur un excellent design graphique et n'a pour finalité que de proposer des orientations très en amont de la conception. ArchiWizard a été conçu récemment pour

---

5. [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/) (Department of Energy) : 398 outils de simulations appliqués au bâtiment présentés

6. <http://www.archiwizard.fr/>

la modélisation de bâtiments à basse consommation. Son résultat permet d'obtenir des tendances et d'avoir rapidement des résultats, par exemple sur l'impact d'une modification géométrique.

**Comfie+Pléiades** [55] est un outil développé au Centre Énergétique et Procédé de Mines ParisTech dont le calcul consiste à réduire un modèle aux différences finies par analyse modale, cette technique de réduction permettant de réduire les temps de calcul. Il s'agit de simulations dynamiques permettant avec un niveau de précision acceptable de représenter des consommations énergétiques en hiver ou des niveaux d'inconfort d'été avec une modélisation multizone. Les données peuvent être exportées vers l'environnement TRNSYS, de manière à étudier les équipements. Comme ArchiWizard, il intègre un module de calcul RT2012.

**CoDyBa** (pour «COMportement DYnamique des BATiments») est un outil développé à Lyon sur la base des travaux de thèse de J.J. Roux (1984). Le coeur de calcul d'architecture modulaire utilise la réduction modale du problème physique, ce qui le rend très rapide et a évolué vers KOZIBU qui a conservé les méthodes de résolution de CODYBA mais a été programmé en utilisant une hiérarchie de classes pour représenter le bâtiment. Il peut en particulier être couplé avec d'autres logiciels de thermique du bâtiment tels que TRNSYS [50].

Comfie et CoDyBa sont des outils permettant une modélisation en régime dynamique mais la modélisation des systèmes énergétiques est très simplifiée notamment dans la prise en compte des phénomènes hydriques ou des modélisations aérauliques. Ce sont de bons outils de dimensionnement d'enveloppe ou d'optimisation qui peuvent prévoir une évolution du niveau de température en condition réelle de fonctionnement comme EnergyPlus et Trnsys (voir figure 1.4b).

**Spark** (Simulation Problem Analysis and Research Kernel) est un environnement de simulation général permettant de résoudre de façon efficace des systèmes d'équations algébriques et différentielles [63]. Il a été développé essentiellement au LBNL<sup>7</sup>. En France, les laboratoires du LEPTIAB<sup>8</sup> et le LOCIE<sup>9</sup> ont utilisé et développé cet outil. Son langage de programmation est orienté objet. Il a été développé pour simuler le comportement thermique des bâtiments mais il peut résoudre des équations de n'importe quel domaine scientifique. En France, les principaux sujets des travaux avec Spark ont porté sur le transfert-aéraulique par les modèles zonaux (thèse de E. Wurtz (1995) [64]), le transfert-aéraulique par des modèles de différents niveaux de finesse (thèse de L. Mora (2003) [45]), le développement de modèle pour la modélisation de la ventilation naturelle (thèse de L. Stephan (2010) [58]), de l'inertie (thèse de L. Chahwane (2011) [12]) et du confort d'été dans des bâtiments à faible inertie (thèse d'A. Brun (2011) [8]). Il s'agit d'un excellent solveur d'équations non linéaire permettant de résoudre tous types de problèmes numériques qui n'a pas fait

---

7. LBNL : Lawrence Berkeley National Laboratory

8. LEPTIAB : Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert de de l'Instantanéité

9. LOCIE : Laboratoire d'Optimisation et de la Conception et Ingénierie de l'Environnement

l'objet de campagne de validation sur le terrain ce qui en fait davantage un outil académique.

### 1.3.4.2 Outils utilisés au niveau international

**PHPP**<sup>10</sup> est développé par le Passivhaus Institut à Darmstadt en Allemagne. Il utilise l'outil Excel dans lequel on renseigne les données du bâtiment. Il emploie une méthode de calcul statique basée sur un bilan énergétique mensuel basé sur les normes européennes, notamment l'EN 13829. Il permet d'obtenir les besoins de chauffage, les besoins de climatisation, la puissance de chauffage et de refroidissement et le besoin en énergie primaire ainsi qu'une tendance pour le nombre d'heures d'inconfort en période estivale. Cet outil est principalement utilisé en Allemagne, il sert de base pour l'attribution du label PassivHaus et ne concerne que la réalisation de maison passives. Il n'y a pas de simulations dynamiques réalisées et les résultats sont issus de données statistiques sur des bâtiments de même type.

**EnergyPlus** [30] est un outil disponible librement basé sur deux outils de simulation BLAST et DOE-2, c'est le département de l'énergie des États Unis (DOE) qui finance cet outil et le LBNL<sup>11</sup> coordonne le développement. Il permet la simulation de systèmes énergétiques complexes, la bibliothèque de modèles est importante mais plutôt adaptée à la simulation des systèmes existant aux États-Unis. Il inclut la résolution avec un pas de temps inférieur à l'heure et pour pouvoir modéliser le bâtiment en 3D facilement, un plugin a été développé dans Google Sketchup pour la saisie géométrique du bâtiment. Son interface n'est pas conviviale mais l'outil Design Builder intègre une interface conviviale tout en utilisant la robustesse des algorithmes développés par EnergyPlus ce qui le rend pertinent et efficace pour l'optimisation énergétique de bâtiments sans pour autant garantir un excellent niveau de précision de la température dans les bâtiment dans le cas d'évolution libre.

**Trnsys** (Transient System Simulation Tool) est développé par l'université de Wisconsin et une entreprise privée TESS, le groupe TransSolar en Allemagne et le CSTB en France interviennent sur la diffusion du logiciel et l'interface pour les utilisateurs. C'est un environnement modulaire et très flexible qui inclut une interface graphique et une librairie de composants pour modéliser les systèmes énergétiques appliqués aux bâtiments. Il intègre la possibilité de créer ses propres composants et peut être couplé à d'autres outils comme COMIS, CONTAM, EES, Excel, FLUENT, GenOpt et Matlab. De fonctionnalité analogue à EnergyPlus il est intéressant par son aspect modulaire qui facilite le développement de modèles spécifiques.

**Virtual Environment** édité par IES Software Ltd, est un logiciel d'aide à la décision. Il permet de concevoir des bâtiments à faible consommation énergétique et aide à orienter le projet vers des objectifs de confort, d'économie, de performance et de qualité environnementale. Il peut être utilisé à chaque étape de la conception. C'est un outil très abouti avec de nombreuses fonctionnalités comme un module

---

10. PHPP : Passive House Planning Package

11. LBNL : Lawrence Berkeley National Laboratory

CFD<sup>12</sup>, il permet de modéliser l'évacuation du bâtiment permettant d'améliorer la sécurité, l'éclairage naturel et artificiel. Il est bien adapté aux besoins des bureaux d'études.

**ESP-r** est un outil développé à la base par des chercheurs de l'université de Strathclyde à Glasgow (Ecosse) depuis 1974 et a été rendu "open source" récemment. Il permet la résolution de problèmes de thermique, d'acoustique et d'éclairage et a fait l'objet de nombreuses validations (Strachan et al. (2008) [59]) principalement dans le cadre d'annexes de l'Agence Internationale de l'Énergie. Le manque de facilité de prise en main et de base de données pour les matériaux en font un outil plus adapté à la recherche. Il a l'avantage de posséder la fonctionnalité de propager des incertitudes (Macdonald (2007) [37]). Il permet l'affichage des prévisions dans une bande d'incertitude tout en considérant les incertitudes sur les paramètres d'entrées comme les propriétés thermo physiques des matériaux, le débit d'infiltration, les scénarios d'occupation et les charges internes, les corrélations de convection, le climat météorologique...

**Matlab/Simulink** Simulink est une interface graphique du logiciel Matlab permettant un accès rapide à celui ci et à ces nombreuses potentialités comme le développement algorithmique, l'analyse et la visualisation de données. Simulink est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communication et de traitement du signal. Le CSTB a développé des modèles relatifs à la simulation des bâtiments au sein du logiciel SIMBAD qui fournit des modèles de bâtiment et des composants des systèmes de chauffage/climatisation pour réaliser des simulations dynamiques des installations de génie climatique et permet le développement et le test de régulateurs. Les modèles de bâtiment sont représentés par des diagrammes en bloc, aucun accès aux équations n'est possible, ce qui rend cet outil peu flexible.

Les outils présentés permettent la modélisation précise des systèmes pour effectuer au mieux la phase de conception d'un bâtiment et ainsi pouvoir proposer des solutions d'amélioration et d'optimisation. Ils sont adaptés à des utilisateurs ayant des connaissances dans le domaine de la modélisation. Une bonne maîtrise de ces outils est nécessaire pour obtenir des résultats cohérents. Les résultats de l'étude réalisée par A. Brun et al (2009) [9] montrant les écarts entre différents outils de simulation, confirme la grande sensibilité des codes de calcul à la variation de paramètres physiques assez mal identifiés. Ces travaux montrent qu'il est important de travailler sur la définition des sources d'incertitudes dans le bâtiment tant au niveau de la validité des paramètres qu'à l'imperfection des modèles numériques utilisés. Des méthodes ont été développées qui permettent d'identifier les paramètres influents. Par la suite un aperçu des méthodes d'analyse de sensibilité appliquées au domaine du bâtiment sera décrit.

---

12. Computational fluid dynamics



## 1.4 État de l'art des méthodes d'analyses de sensibilité

### 1.4.1 Description des méthodes d'analyse de sensibilité

Nous allons présenter les méthodes d'analyse de sensibilité les plus utilisées. Nous supposons que le modèle étudié peut se mettre sous la forme :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x) \quad (1.2)$$

$y$  est la sortie du modèle et  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  est l'ensemble des paramètres considérés du modèle.

Les analyses de sensibilité sont des méthodes permettant d'observer la contribution des paramètres d'entrée d'un modèle à la variation des sorties du modèle. Ce sont des méthodes très importantes dans des travaux d'élaboration de modèle (numérique ou non), dans l'interprétation de leurs résultats et dans le cadre de leur validation. L'analyse de sensibilité est une discipline à part entière de la statistique.

L'analyse de sensibilité permet de déterminer :

- Les paramètres ayant une forte influence sur la sortie du modèle. Cette information permet de savoir si la modélisation reflète correctement le modèle physique. Si l'analyse détermine qu'un paramètre connu comme non influent a une importance forte, la modélisation ne représentera pas fidèlement le modèle il faudra alors modifier la modélisation.
- Les paramètres ayant une grande variabilité sur la sortie du modèle. Une meilleure connaissance de ces paramètres permettra de réduire les erreurs sur les sorties du modèle.
- Les paramètres ayant peu voire pas d'influence sur la sortie du modèle. Une valeur par défaut pour ces paramètres pourra être choisie.
- Les corrélations entre les paramètres. La connaissance des interactions permet de mieux comprendre le phénomène modélisé et permet de s'intéresser à des groupes de paramètres plutôt qu'à un paramètre isolé.

Les analyses de sensibilité sont utilisées dans de nombreux domaines. A. Saltelli [57],[56] présente quelques exemples dans les domaines de l'écologie, la chimie, les matériaux semi-conducteurs et l'économie. Julien Jacques [31] a utilisé les analyses de sensibilité en sûreté nucléaire pour des études d'impact sur l'environnement dans le cadre de sa thèse (2005) intitulée "Contribution à l'analyse de sensibilité et à l'analyse discriminante généralisée".

Différentes méthodes d'analyses de sensibilité existent, A. Saltelli (2008) [56] en dresse un large aperçu. Les méthodes qui existent sont :

- La méthode du Screening qui permet avec un faible nombre de simulation de déterminer les paramètres les plus influents qui émettent une information qualitative.

- Les méthodes de sensibilité locales et globales qui permettent de déterminer les effets des paramètres sur la sortie du modèle.
- L'analyse d'incertitude qui permet de déterminer un intervalle de confiance pour la sortie du modèle.
- La calibration qui permet d'effectuer une comparaison avec l'expérimentation et ainsi déterminer les valeurs optimales des paramètres.

### 1.4.1.1 Méthode de Screening

Les modèles mathématiques sont souvent complexes et impliquent un grand nombre de paramètres d'entrée. La question qui se pose est : quels paramètres sont réellement influents sur les sorties du modèle qui nous intéressent ?

Pour identifier les paramètres les plus importants parmi un grand nombre de paramètres, le choix de l'expérience est essentiel. Elle doit permettre avec un nombre de simulation limité d'obtenir un résultat. La méthode de Screening permet d'obtenir cette information. Elle est peu coûteuse en temps de calcul et elle est utilisée dans différents domaines. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle permet uniquement d'obtenir une information qualitative sur les paramètres les plus influents. Les paramètres sont classés par ordre d'importance mais cette méthode ne permet pas de quantifier l'importance d'un paramètre par rapport à un autre.

M.D. Morris (1991) [46] a proposé une méthode qui fait varier un paramètre à la fois. Elle permet de classer les entrées en trois groupes selon leurs effets :

- effets négligeables
- effets linéaires et sans interaction
- effets non linéaires et/ou avec interactions

Rahni N. et al (1997) [54] a utilisé la méthode de screening par groupe proposée par Watson (1960) en l'appliquant à la cellule ETNA modélisée avec l'outil CLIM2000 développé par le centre de recherche d'électricité de France (EDF) situé aux Renardières. Pour les auteurs, cette méthode a le désavantage de ne pas permettre la connaissance du signe de l'effet du paramètre sur la sortie. Ils ont sélectionné 23 paramètres influents sur les 390 paramètres d'entrée et le nombre de simulations a été de 136. Cette étude a permis d'affirmer la possibilité d'utiliser la méthode de screening dans le domaine du bâtiment. De plus une analyse d'incertitude a été réalisée en considérant les 23 paramètres sélectionnés et tous les paramètres et les résultats ont montré une bonne cohérence prouvant l'efficacité de la méthode de screening.

### 1.4.1.2 Analyses de sensibilité locale

Les analyses de sensibilité locale estiment la dérivée de la sortie  $y$  par rapport au paramètre  $i$  au voisinage de la valeur nominale des paramètres :

$$\left. \frac{\partial Y}{\partial x_i} \right|_{X=X_0} \quad (1.3)$$



Pour un calcul dynamique, la dérivée s'effectue pour chaque pas de temps.

L'analyse de sensibilité locale permet avec un grand jeu de paramètres et un faible nombre de simulations d'obtenir une information qualitative sur les paramètres influençant le plus la sortie du modèle. Elles (A. Saltelli (2008) [56]) sont simples à mettre en place et sont idéales lorsque le nombre de facteurs d'entrée est trop important pour appliquer directement une analyse de sensibilité globale. Dans cette méthode un seul paramètre varie à la fois, les autres restants à leur valeur nominale, ce qui évite les problèmes d'effets d'annulation (lorsque les effets de deux facteurs ayant des influences sur la sortie s'annulent entre eux). Cette grandeur permet de connaître l'effet du paramètre  $i$ , sachant que sa variation autour de sa valeur nominale ( $x_{i0}$ ) est faible, ce qui permet de garantir le critère de linéarité. La différence  $x_i - x_0$  a un rôle important. Elle doit être suffisamment faible pour que cette analyse soit valide et suffisamment "grande" pour ne pas engendrer de problème numérique. Cette méthode demande un nombre de simulation  $N$  égal au nombre de paramètres ( $k$ ) plus un,  $N = k + 1$ .

En considérant un modèle avec  $k$  facteurs d'entrées indépendantes et pour une valeur de  $X$  donnée, l'indice de sensibilité réduit du  $i^{\text{ème}}$  facteur d'entrée est défini comme :

$$S_i(t) = X_i \frac{\partial y_k(t)}{\partial X_i} \quad (1.4)$$

L'approximation numérique est définie comme :

$$S_i(t) = X_i \frac{\Delta y_k(t)}{\Delta X_i} = X_i \frac{[Y(X_1, X_2, \dots, X_{i+\Delta_i}, \dots, X_k) - Y(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_k)]}{\Delta X_i} \quad (1.5)$$

Où  $X_i$  représente la valeur nominale du paramètre  $i$  et  $\Delta X_i$  représente la valeur de la perturbation de ce paramètre. L'indice de sensibilité réduit permet d'obtenir un indice homogène à la sortie d'où le facteur  $X_i$ .

Cette méthode est simple à mettre en place car elle ne demande pas de procédure mathématique complexe par contre elle ne tient pas compte des effets dus aux interactions entre les paramètres et peut demander un temps de simulation élevé si le nombre de paramètre est grand et le temps de simulation long. Récemment Mejri O. (2011) [44] a utilisé cette méthode dans sa thèse, dans le cas de simulation thermique d'un bâtiment.

### 1.4.1.3 Plans d'expérience

Les plans d'expériences sont des méthodes qui permettent avec un faible nombre d'expérience de connaître l'influence de différents paramètres sur une ou plusieurs réponses avec une grande précision. Ce sont des méthodes mathématiques et statistiques développées au début du XX<sup>ème</sup> siècle par M. Fisher mais c'est seulement dans les années 70 qu'on commence à les utiliser dans l'industrie. Les plans d'expérience permettent d'organiser les essais et de les minimiser. Ils reposent sur des

expérimentations multi facteurs, à l'aide de régressions multiples et d'analyse de la variance, les résultats sont traités rapidement et sont facilement compréhensibles.

Plusieurs méthodes de plans d'expérience existent. Certains plans consistent à analyser un facteur à la fois. Cette méthode a l'inconvénient de ne pas tenir compte des interactions possibles entre les facteurs. La méthode des plans factoriels permet une amélioration de cette stratégie de recherche expérimentale. Cette méthode fait varier tous les facteurs à la fois, de façon organisés et réfléchi. On appelle niveau le nombre de valeurs attribuées à chaque paramètre. Généralement un plan d'expérience a deux niveaux, c'est à dire qu'il n'attribue que deux valeurs à chaque paramètre, la valeur minimum et la valeur maximum. Cela permet de réduire le nombre d'expérience. Les plans d'expérience les plus répandus sont ceux construits à l'aide des tables de Taguchi.

Dans le bâtiment de nombreuses études se sont intéressées aux plans d'expériences. Boulet S. (2009) [5], a utilisé dans sa thèse les plans d'expériences pour l'évaluation du confort hygrothermique et acoustique de l'habitat dans les constructions en bois. Flory-Celini C. (2008) [24], a utilisé les plans d'expérience dans sa thèse pour apporter des solutions bioclimatique aux bâtiments existants. Les simulations ont été effectuées avec l'outil TRNSYS pour deux configurations de bâtiments : bâtiment collectif de 1900 et une maison individuelle de 1966. Chlela F. (2008) [13], a développé une méthodologie à l'aide des plans d'expérience pour optimiser la conception de bâtiment à faible consommation d'énergie.

### 1.4.1.4 Analyses de sensibilité globale

Les analyses de sensibilité globale s'intéressent à l'influence des paramètres sur toute leur plage de variation. Elles prennent en compte la distribution associée au paramètre et permet la variation de tous les paramètres à la fois. Elles sont coûteuses en temps de calcul. Les plus répandues sont les méthodes de Sobol, FAST, Random Balance Design et l'analyse de Monte-Carlo.

**Les indices de sensibilité** sont calculés dans le cas de méthode se basant sur l'étude de la variance consistant à déterminer quelle part de la variance de la réponse est due à la variation de chaque paramètre. Ces techniques comprennent les méthodes FAST et Sobol. Les indices de sensibilité sont :

- L'indice du premier ordre  $S_i$  qui quantifie la sensibilité de la sortie  $y$  par rapport au paramètre d'entrée  $x_i$ .
- L'indice du deuxième ordre  $S_{ij}$  qui quantifie la sensibilité de la sortie  $y$  par rapport à l'interaction croisée de  $x_i$  et  $x_j$  sans prendre en compte l'effet des variables seules.
- Les indices d'ordre supérieur à deux peuvent aussi être déterminés, ils quantifient la sensibilité de la sortie  $y$  par rapport à l'interaction croisée des paramètres sans prendre en compte l'effet des variables seules.
- L'indice total correspond à la sensibilité du paramètre seul et à la sensibilité aux interactions de ce paramètre avec tous les paramètres. Il correspond à

$$S_{Ti} = S_i + S_{ij} + S_{ik} + \dots + S_{ijk} + \dots \quad (1.6)$$

L'interprétation de ces indices est assez facile. Leurs valeurs sont toujours positives. La somme des indices de tout ordre doit normalement être égale à 1. Plus l'indice est grand et donc proche de 1, plus le paramètre a de l'importance.

**La méthode de Sobol** est basée sur des échantillonnages. Pour déterminer l'indice de sensibilité du paramètre  $X_i$ , une matrice  $k \times N$  est créée ( $k$  est le nombre de paramètres pris en compte dans l'analyse et  $N$  la taille de l'échantillon), la distribution des paramètres est aléatoire dans leur plage de variation,  $y_0$  est alors la réponse de ce premier échantillonnage. Ensuite, un échantillonnage est créé par paramètre et la valeur de tous les paramètres est modifiée excepté pour le paramètre  $X_i$ ,  $y_i$  correspond à la réponse de chaque échantillonnage. L'indice de sensibilité peut alors être calculé :

$$S_i = 1 - \frac{\frac{Var(y_i - y_0)}{\sqrt{2}}}{Var(y)} \quad (1.7)$$

A. Saltelli (2008) [56] a proposé une extension à la méthode de Sobol (1990). Cette méthode consiste à générer deux matrices  $u$  et  $v$  de taille  $(N, k)$ .  $N$  est la taille de l'échantillonnage et  $k$  le nombre de paramètres. Les valeurs des paramètres sont générées selon des méthodes de Monte Carlo.

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & \dots & x_i^{(1)} & \dots & x_k^{(1)} \\ x_1^{(2)} & x_2^{(2)} & \dots & x_i^{(2)} & \dots & x_k^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{(N-1)} & x_2^{(N-1)} & \dots & x_i^{(N-1)} & \dots & x_k^{(N-1)} \\ x_1^{(N)} & x_2^{(N)} & \dots & x_i^{(N)} & \dots & x_k^{(N)} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} y_1^{(1)} & y_2^{(1)} & \dots & y_i^{(1)} & \dots & y_k^{(1)} \\ y_1^{(2)} & y_2^{(2)} & \dots & y_i^{(2)} & \dots & y_k^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_1^{(N-1)} & y_2^{(N-1)} & \dots & y_i^{(N-1)} & \dots & y_k^{(N-1)} \\ y_1^{(N)} & y_2^{(N)} & \dots & y_i^{(N)} & \dots & y_k^{(N)} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

La matrice  $w_i$  est formée par toutes les colonnes de  $v$  exceptée la  $i^{\text{ème}}$  colonne qui est prise de  $u$ .

$$\mathbf{w}_i = \begin{bmatrix} y_1^{(1)} & y_2^{(1)} & \dots & x_i^{(1)} & \dots & y_k^{(1)} \\ y_1^{(2)} & y_2^{(2)} & \dots & x_i^{(2)} & \dots & y_k^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_1^{(N-1)} & y_2^{(N-1)} & \dots & x_i^{(N-1)} & \dots & y_k^{(N-1)} \\ y_1^{(N)} & y_2^{(N)} & \dots & x_i^{(N)} & \dots & y_k^{(N)} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Le vecteur de sortie du modèle de dimension  $N \times 1$  est déterminé pour chaque matrice :  
 $y_u = f(u)$ ,  $y_v = f(v)$ ,  $y_{w_i} = f(w_i)$ .

Les indices du premier ordre sont déterminés selon :

$$S_i = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_u^{(j)} y_w^{(j)} - f_0^2}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_u^{(j)2} - f_0^2} \quad (1.11)$$

où

$$f_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_u^{(j)}$$

Les indices totaux sont égaux à

$$ST_i = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_v^{(j)} y_w^{(j)} - f_0^2}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_u^{(j)2} - f_0^2} \quad (1.12)$$

Le nombre de simulations pour définir les indices du premier ordre est égal à :

$$N(k+1)$$

Le calcul des indices totaux rajoute N simulations si les indices du premier ordre ont été calculés et le nombre total de simulation est :

$$N(k+2)$$

**La méthode FAST** (Fourier Amplitude Sensitivity Test) est basée sur la variation des facteurs d'entrées selon une sinusoïde avec des fréquences différentes ( $w_1, w_2, \dots, w_n$ ). Les échantillonnages sont générés ainsi :

$$X_i(s_i) = G_i(\sin w_i s_j) \text{ pour } i=1, \dots, k \text{ et } j=1, \dots, k \quad (1.13)$$

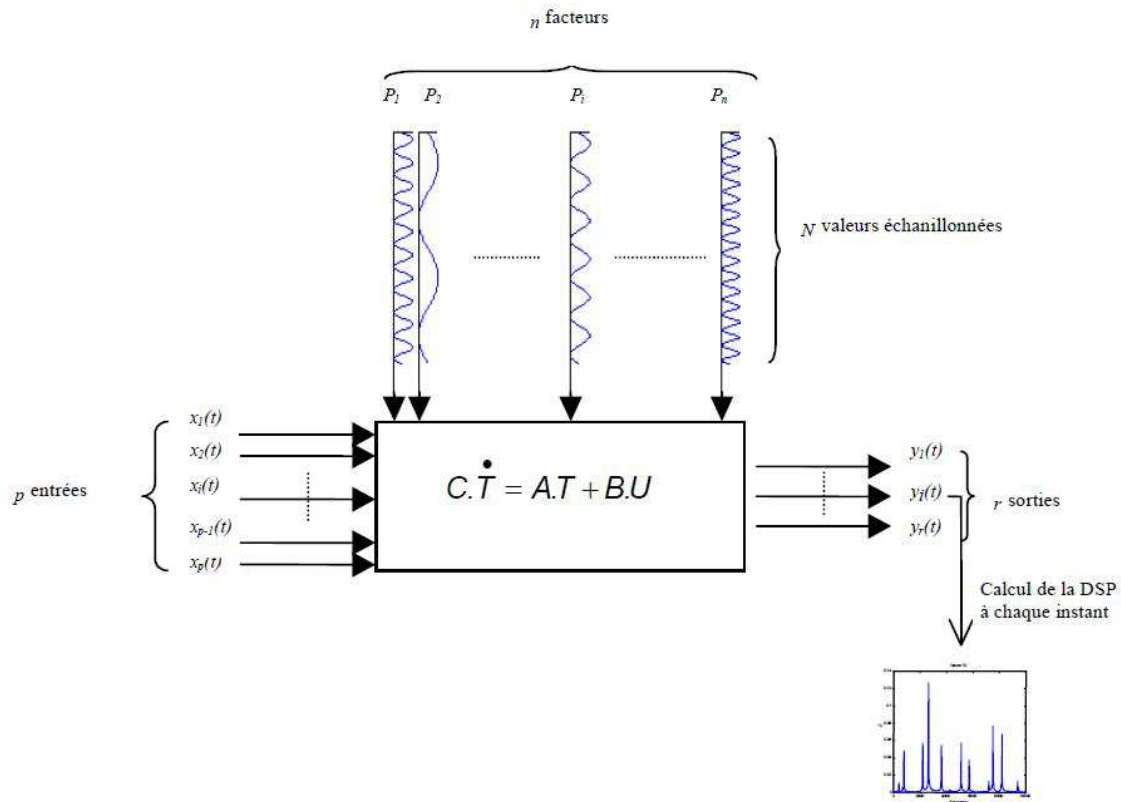
Avec  $X_i$  le  $i^{\text{ème}}$  paramètre d'entrée, la fonction  $G_i$  est choisie selon une densité de probabilité appropriée de  $X_i$ ,  $s_i$  est discrétisée de manière croissante dans l'intervalle  $[-\pi, \pi]$  et  $w_i$  sont les fréquences entières associées aux paramètres  $X_i$ . L'effet principal d'un paramètre est calculé en considérant sa fréquence associée ainsi que ses harmoniques sur le spectre de la sortie considérée. Il se calcule de la manière suivante :

$$S_i = \frac{\sum_{p=1}^{+\infty} (A_{pwi}^2 + B_{pwi}^2)}{\sum_{p=1}^{+\infty} (A_p^2 + B_p^2)} \quad (1.14)$$

Avec A et B les coefficients de la transformée de Fourier de Y en cosinus et sinus respectivement.

Pour calculer l'indice de sensibilité du premier ordre et total selon la méthode extended FAST, une fréquence  $f_i$  est choisie pour le paramètre  $x_i$  tandis que tous les autres paramètres ont une fréquence  $f_{i'}$  égale voir proche entre elles. La fréquence  $f_i$  choisie pour le paramètre  $x_i$  doit être éloignée des fréquences associées aux autres paramètres afin d'éviter tout problème d'interférence.

T.A. Mara et al (2002) [41] présentent une méthode pour identifier les paramètres les plus influents. Cette méthode présentée sur la figure 1.5 a de nombreux points communs avec la méthode FAST. Ils effectuent une comparaison entre les mesures et les résultats de simulation. L'analyse de sensibilité a permis de faire un diagnostic du bâtiment et a montré les faiblesses du modèle physique et on en conclut que le nombre de paramètres dans une étude de sensibilité peut être réduit. Seules l'épaisseur et la conductivité thermique d'un matériau peuvent être prises en compte car si le modèle est sensible à la conductance d'un matériau, c'est l'épaisseur et la conductivité qui seront les paramètres influents alors que si le modèle est sensible à l'inertie, c'est l'épaisseur qui sera influente.



**Figure 1.5** – Description de la méthode d'analyse de sensibilité globale. A chaque simulation, les paramètres évoluent de manière à décrire une fonction périodique (extrait de Mara, 2000 [39])

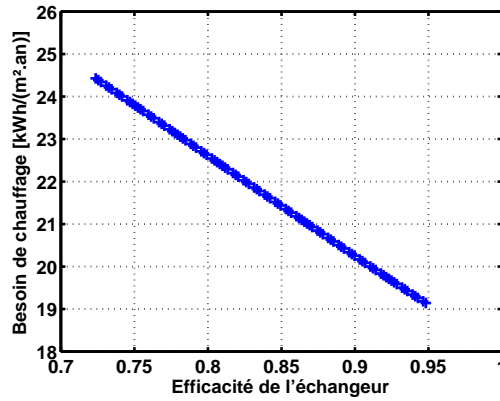
T.A. Mara et al (2008) [42] comparent trois méthodes : la méthode FAST, la méthode de Sobol et une méthode qui utilise des régressions polynomiales itérées à une dimension. Ils en concluent que le calcul de l'indice de sensibilité pour huit paramètres est plus précis avec la méthode utilisant les régressions polynomiales itérées à une dimension que les méthodes FAST et de Sobol. La méthode de Sobol a l'inconvénient d'obtenir des indices de sensibilité négatifs. Pour faire cette étude, ils ont effectué une simulation thermique considérant 21 paramètres d'une cellule test de l'île de la Réunion. Ils en concluent que quatre paramètres sont prépondérants dans

l'influence de la température d'air intérieur. Par ailleurs ils ont déterminé l'incertitude du confort thermique par rapport au réchauffement climatique et concluent que la ventilation naturelle dimensionnée pour des conditions météorologiques normales ne permet pas de garantir des conditions de confort confortables pour des climats chauds. Cette étude a permis une meilleure compréhension de la performance de la ventilation naturelle et d'optimiser la conception du bâtiment. Xavier Faure (2007) [23] dans sa thèse intitulée "optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique" a utilisé les méthodes FAST pour l'identification des paramètres les plus influents dans le cas d'une simulation pour une enveloppe hybride.

**La méthode Random Balance Design -Fourier Amplitude Sensitivity Test (RBD-FAST)** Contrairement à la méthode FAST, tous les facteurs sont échantillonnés suivant la même fréquence  $w$ . Le spectre de Fourier est déterminé pour la fréquence  $w$  et pour des hautes harmoniques ( $w, 2w, \dots, Mw$ ). De ce spectre, on peut alors déterminer les indices de sensibilité de tous ordres. Cette méthode est moins coûteuse en nombre de simulation que la méthode FAST. Elle a été introduite pour la première fois par Tarantola et al. (2006) [60] et c'est l'extension de la technique RBD originale. Le désavantage de cette méthode est qu'elle requiert un nombre de simulations croissant avec le nombre de facteurs. T.A. Mara (2009) [40] a proposé une amélioration de cette technique qui permet de diminuer le nombre de simulations et de calculer l'effet total.

**L'analyse de Monte-Carlo** a l'avantage de réaliser avec la même méthode l'analyse d'incertitude et l'analyse de sensibilité. Il s'agit de générer un échantillonnage pour les paramètres dans leur plage de variation. La technique d'échantillonnages Latin Hypercube Sampling (LHS) est souvent utilisée, cette méthode permet d'avoir une meilleure exploration de l'espace des paramètres. Le nombre de simulations nécessaire aux estimations des indices de sensibilité est propre à chaque modèle et à la précision désirée. Mais plus le modèle sera complexe (nombre de paramètre d'entrée...) plus le nombre devra être important. Pour chaque combinaison, il s'agit de calculer la sortie du modèle. L'analyse des résultats de simulation permet de calculer les grandeurs statistiques (moyenne, variance...). Un premier résultat peut être obtenu en analysant les courbes représentant l'évolution des sorties en fonction des valeurs des paramètres d'entrées. Avec ces courbes, il est possible d'observer la linéarité entre sortie et entrée ou des valeurs seuils ou encore la valeur du paramètre ayant plus d'influence sur la sortie. La figure 1.6 représente l'évolution du besoin de chauffage en fonction de la valeur de l'efficacité de l'échangeur pour la maison I-DM avec 100 simulations effectuées. On observe une courbe linéaire et plus l'efficacité est élevée plus le besoin de chauffage est faible.

Burhenne S. et al (2010) [11] utilisent cette méthode dans le cas de la simulation thermique d'un bâtiment allemand et après avoir effectué une analyse d'incertitude avec la méthode de Monte Carlo, ils observent les relations entrée/sortie en traçant les graphiques. L'inconvénient de ce traitement est d'obtenir une courbe par paramètre. Si le nombre de paramètre est trop important, l'analyse est trop fastidieuse en temps de traitement.



**Figure 1.6** – Variation du besoin de chauffage en fonction de la valeur de l’efficacité de l’échangeur pour la maison I-DM

Il est alors possible d’approximer le modèle par un polynôme :

$$\tilde{y}_i = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i \quad (1.15)$$

où

- $\tilde{y}_i$  représente l’estimation de la sortie de  $y_i$
- $x_i$  représente le paramètre d’entrée
- $k$  représente le nombre de paramètre d’entrée
- $i$  est le numéro de l’échantillonnage
- $b$  sont les coefficients de régression, le signe de  $b_i$  renseigne sur le sens de variation de la sortie et si  $b_i > 0$  cela signifie qu’une augmentation du paramètre  $x_i$  aura pour effet d’augmenter la valeur de  $y$

Le polynôme est généralement du premier ordre si le modèle est non linéaire mais il est possible que le polynôme soit d’ordre supérieur. Le coefficient de régression  $b_i$  ne permet pas de trier les paramètres par ordre d’influence. Les valeurs intéressantes à calculer sont les coefficients de régression standardisés SRC pour  $N$  égal au nombre de simulation :

$$SRC = \frac{b_j \hat{\sigma}_j}{\hat{\sigma}} \quad (1.16)$$

Avec

$$\hat{\sigma} = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - \mu(y))^2}{N-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \hat{\sigma}_j = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(x_{ij} - \mu(x_j))^2}{N-1} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\mu(y) = \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{N} \quad \mu(x_j) = \sum_{i=1}^N \frac{x_{ij}}{N}$$

SRC détermine l’effet de la variation d’un paramètre d’entrée pour une variation fixe de son écart-type sur la variation de la sortie. Il est aussi possible de déterminer le coefficient de détermination  $R^2$  :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \mu(y_i))^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \mu(y_i))^2} \quad (1.17)$$

Si le résultat de  $R^2$  est proche de 1 alors l'approximation du modèle original est bonne et les paramètres considérés dans l'analyse de sensibilité sont en majeure partie responsables de l'incertitude sur la sortie  $y$ .

Macdonald I. (2002) [38] a utilisé la méthode des analyses de Monte Carlo dans sa thèse dans le cas de la simulation thermique de bâtiment. F. Domínguez-Munóz et al (2010) [21] a déterminé les coefficients de régression standardisés des paramètres et a ensuite propagé l'incertitude des paramètres les plus influents pour déterminer une bande d'incertitude pour les pics de consommations de froid. H. Breesch et al (2010) [7] effectuent une étude pour prédire l'efficacité de la ventilation naturelle d'un bâtiment tout en tenant compte de l'incertitude sur les entrées en utilisant la méthode de Monte Carlo pour effectuer leur analyse de sensibilité globale. Ils ont déterminé les coefficients de régression standardisés SRC en appliquant les étapes suivantes :

- sélection des paramètres avec leur incertitude et leur distribution
- génération de l'échantillonnage
- évaluation du modèle pour chaque élément de l'échantillonnage
- analyse d'incertitude
- analyse de sensibilité

La technique d'échantillonnage Latin Hypercube Sampling (LHS) a été choisie en utilisant l'outil TRNFLOW [62]. Sur les 70 paramètres considérés, les plus influents sur le confort thermique sont :

- les gains internes
- le coefficient d'absorption des protections solaires
- le coefficient de convection intérieur
- les propriétés thermo-physique des matériaux possédant une masse thermique
- la consigne de la température contrôlant la ventilation naturelle
- le coefficient de décharge  $C_d$
- le coefficient de pression du vent  $C_p$

P. de Wilde et al (2010) [17] prédisent la performance d'un bâtiment en prenant en compte le réchauffement climatique avec l'analyse de Monte Carlo. Pour les simulations, ils ont choisi l'outil EnergyPlus [16] en considérant trois indicateurs : l'émission de gaz à effet de serre, le risque de surchauffe et la performance du bâti. Pour le fichier d'entrée de l'analyse de sensibilité, ils ont utilisé Simlab pour la génération des échantillonnages et Excel VBA pour créer les fichiers. Les résultats d'analyse de sensibilité indiquent que les gains internes dus aux équipements et aux luminaires sont les paramètres les plus influents sur l'incertitude des émissions de gaz à effet de serre. Une utilisation optimale de la lumière naturelle réduit les risques de surchauffe. Pour effectuer une analyse de sensibilité sur le risque de surchauffe du bâtiment, la division par zone thermique est importante pour obtenir des bons résultats tandis que lors de l'étude des émissions de gaz à effet de serre une zone thermique est suffisante. L'utilisation de la méthode de Monte Carlo pour les analyses de sensibilité a souvent été employée ces dernières années car elle permet d'effectuer avec le même nombre de simulation l'analyse de sensibilité et l'analyse d'incertitude.



Les méthodes d'analyse de sensibilité globale sont nombreuses. La principale différenciation entre ces méthodes est le temps de simulation car le nombre de simulation peut être très variable pour obtenir un résultat fiable. A la suite d'une analyse de sensibilité, il est intéressant d'effectuer une analyse d'incertitude.

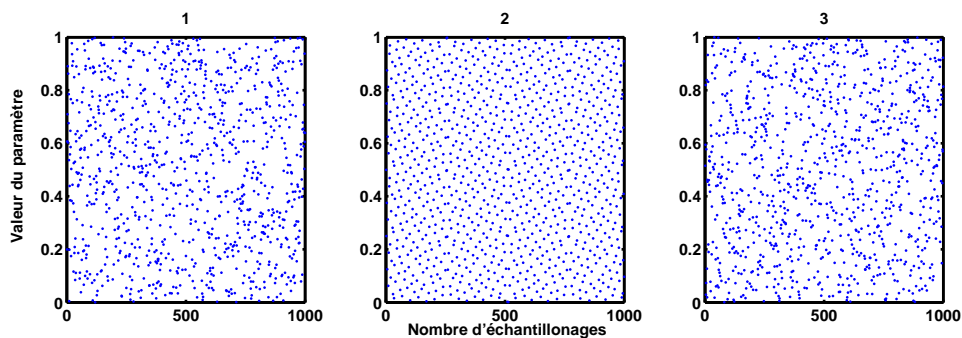
### 1.4.2 Analyse d'incertitude

Une analyse d'incertitude permet de caractériser la réponse d'un modèle dans un intervalle de confiance connaissant l'incertitude des paramètres d'entrée. En connaissant l'incertitude associée à un paramètre, un échantillonnage ainsi qu'une distribution doivent être choisis.

**Les techniques d'échantillonnage** existantes sont nombreuses :

1. La méthode de Monte Carlo crée un échantillonnage aléatoire dans la plage de variation du paramètre et suivant sa distribution. Cette méthode est facile à mettre en place mais elle a comme principal désavantage un nombre de simulation élevé pour obtenir des résultats satisfaisants.
2. Les méthodes de Quasi-Monte Carlo sont des versions déterministes des méthodes de Monte Carlo. Ces méthodes ont une meilleure vitesse de convergence que Monte Carlo standard, pour un même nombre de points.
3. L'échantillonnage Latin Hypercube Sampling (LHS) est une technique d'échantillonnage qui permet une exploration offrant une bonne couverture de l'espace des facteurs.

La figure 1.7 représente les trois techniques pour une taille d'échantillonnage de 1000 pour une valeur de paramètre entre 0 et 1.

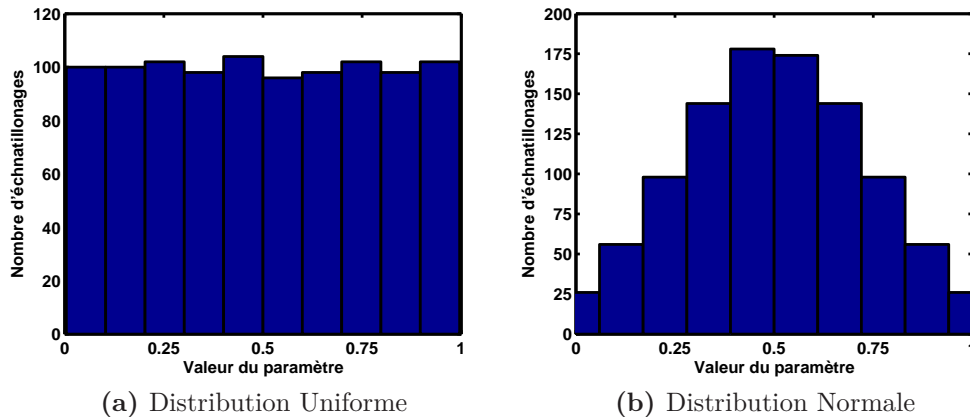


**Figure 1.7** – Les trois techniques d'échantillonnage : 1 = la méthode de Monte Carlo, 2 = la méthode de Quasi-Monte Carlo et 3 = l'échantillonnage Latin Hypercube Sampling

**La distribution des paramètres** doit être choisie en fonction du paramètre. Plusieurs distributions peuvent être utilisées dans la simulation de bâtiment [38] et dans la suite du travail nous en utiliserons deux, les plus répandues et nous ne présenterons pas les autres distributions possibles. Les deux distributions sont :

1. La distribution uniforme.
2. La distribution normale : elle est la plus souvent employée pour des mesures physiques.

La figure 1.8 représente les deux distributions utilisées.



**Figure 1.8** – Les deux distributions utilisées : la distribution uniforme et la distribution normale

L'analyse d'incertitude des modèles évalue l'incertitude induite sur la sortie du modèle par les erreurs affectant les paramètres. L'approche la plus naturelle s'appuie sur des échantillonnages aléatoires (Monte Carlo). Le nombre d'échantillonnage doit être élevé, ce qui conduit à des temps de calcul très importants.

Dans la littérature plusieurs chercheurs se sont intéressés à effectuer des études d'incertitudes avec des outils de simulation thermique de bâtiments. Ces études peuvent être lourdes en temps de calcul si elles ne sont pas automatisées. I. Macdonald et al (2002) [36] décrivent une analyse d'incertitude qui a été incorporée à l'outil ESP-r basée sur celle de Monte Carlo. Ils définissent trois phases distinctes importantes dans une étude d'incertitude :

- la définition des incertitudes
- la phase des simulations
- l'analyse des résultats

Ces phases ont été implémentées dans l'outil ESP-r. En implémentant de telles études directement dans un outil cela permet de rendre ces analyses plus facilement accessibles pour la communauté.

S. de Wit et al (2001) [18] listent les paramètres ayant le plus d'influence sur le confort thermique dans un bâtiment naturellement ventilé. Ils effectuent une étude d'incertitude sur une pièce située au dernier étage d'un bâtiment naturellement ventilé aux Pays Bas. Ils utilisent deux outils de simulation thermique ESP-r et BFEP et limitent leur étude au confort thermique. Ils utilisent la méthode de Screening

proposé par Morris (1991) [46] pour déterminer sur les 89 paramètres identifiés les plus influents. Cinq paramètres sont responsables de la majorité de l'incertitude sur le confort thermique :

- le coefficient de pression du vent
- le facteur de réduction du vent
- la stratification de la température
- la température extérieure
- le coefficient de convection extérieur

Tous ces travaux ont montré que l'évaluation de chacune des alternatives doit permettre d'aider le concepteur à prendre sa décision. Le fait de disposer de l'incertitude associée au résultat peut montrer les limites de la recherche d'une meilleure solution alors que les résultats des différentes alternatives sont confondus dans la même bande d'incertitude.

### 1.5 Conclusion

Ce premier chapitre a présenté différentes sources d'incertitudes concernant notamment les outils de simulation thermique dynamique appliqués aux bâtiments à faible consommation. La simulation est un outil d'aide à la décision essentiel et un outil de persuasion pour faire adopter les meilleures solutions techniques. Elle permet d'évaluer différentes alternatives au regard de la performance énergétique et du confort des occupants. De nombreux outils existent et les plus répandus ont été présentés dans ce chapitre. Cependant bien que ces outils existent depuis longtemps, leur fiabilité est mise en doute car on observe de nombreux écarts dans les résultats entre les outils et par rapport à la réalité dans le cas de bâtiments à faible consommation énergétique.

De plus aujourd'hui, on s'intéresse de plus en plus à la garantie de performance énergétique des bâtiments qui consiste à vérifier que les performances réelles d'un bâtiment sont bien en adéquation avec les objectifs fixés dans le projet lors de la conception. Dans le cas de comparaison entre les phases d'étude et d'occupation de nombreux écarts sont observés. L'exemple de données météo mesurées par rapport au fichier moyen utilisé a montré une variabilité sur les résultats de modélisation des besoins de chauffage d'une maison à faible consommation d'énergie. La difficulté de la prévision du climat induit des incertitudes sur les résultats de simulation et on a vu que d'autres sources d'incertitudes peuvent impacter la garantie de performance.

Une présentation des analyses de sensibilité appliquées aux bâtiments a été décrite. Ces méthodes permettent d'identifier un jeu réduit de paramètres ayant une influence prédominante vis à vis des autres paramètres. Une meilleure connaissance des paramètres influents permettra une meilleure prédiction. Une analyse d'incertitude permet de caractériser la réponse d'un modèle dans un intervalle de confiance connaissant à priori l'incertitude des paramètres d'entrée. Les analyses de sensibilité et les analyses d'incertitude permettent dans le cadre d'une expérimentation

d'améliorer le comportement entre le modèle et la mesure, on peut alors parler de validation du modèle. Fürbringer (1999) [25] définit les analyses de sensibilité comme essentielles dans le domaine de la simulation du bâtiment et il est nécessaire de les implémenter directement dans les outils.

Dans la suite de ces travaux, on va s'intéresser à définir les différentes sources d'incertitude tant dans la mesure des performances que dans les résultats de simulation numérique. Après avoir mis en évidence la nécessité de traiter cette problématique d'incertitude et les différentes méthodes qui permettent de les identifier, on va maintenant considérer l'exemple de la plateforme expérimentale de l'INES en mettant en avant l'ensemble des problématiques qui ont été rencontrées au cours des mesures et qui nous ont conduits à proposer la méthodologie de prise en compte des incertitudes qui sera présentée par la suite.



## CHAPITRE 2

---

### La problématique des incertitudes en regard d'une plateforme d'expérimentation

---

*Ce chapitre présente la plateforme d'expérimentation INCAS et plus particulièrement les deux maisons sur lesquelles portent ces travaux. Dans une première partie, nous décrivons la conception des maisons puis nous verrons l'instrumentation mise en place sur le site de la plate-forme INCAS ainsi que leurs incertitudes de mesure. Enfin dans une troisième partie, nous analyserons les résultats de mesure et nous déterminerons une plage d'incertitude pour la température d'air mesurée des maisons par niveau.*

## 2.1 Cadre d’étude : les maisons INCAS

### 2.1.1 La plate-forme INCAS



**Figure 2.1** – La plate-forme INCAS

La plate-forme INCAS (figure 2.1) est un site destiné à la construction de bâtiments expérimentaux dédiés à la recherche sur l’efficacité énergétique du bâtiment. Ce site est situé dans l’enceinte de l’Institut National de l’Énergie Solaire (INES) sur la technopole de Savoie Technolac au Bourget du Lac en Savoie. Elle est actuellement constituée de trois constructions à faible consommation énergétique, de 10 bancs expérimentaux d’intégration de toiture photovoltaïque et de quatre cellules PASSYS dont deux cellules orientables.

La figure 2.2 représente les trois bâtiments actuellement construits, deux à forte inertie : une Double Mur (I-DM) une en Béton Banché (I-BB) et une à Ossature Bois (I-OB). Les maisons expérimentales sont basées sur une géométrie très proche, simple et compacte. Les bâtiments ont été construits dans le cadre du projet MAISONPASSIVE financé par l’ANR et ont fait l’objet de plusieurs projets de recherche dont le projet ANR BATIMETRE pour la mise en place de la métrologie. L’objectif de ces maisons est multiple :

- valider les codes de simulation
- évaluer les performances de différents modes constructifs
- tester l’efficacité de différents systèmes énergétiques

Les codes de simulation seront utilisés pour évaluer le comportement thermique, pour valider les modèles thermiques et aussi pour vérifier la conception du bâtiment après construction. Pour s’affranchir des incertitudes liées aux comportements des occupants, les maisons ne sont pas habitées. Les maisons permettent aussi de tester de nouveaux systèmes énergétiques adaptés aux maisons à faible consommation énergétique. Dans notre cas, ces maisons permettent de valider les modèles thermiques.



**Figure 2.2** – Les trois maisons INCAS

### 2.1.2 Description des maisons INCAS double mur et béton

Les maisons INCAS sont des bâtiments expérimentaux construits pour permettre d'évaluer les enjeux de l'optimisation des bâtiments neufs en regard de la consommation énergétique. Elles ont été conçues pour être à bilan énergétique équilibré et les besoins de chauffage correspondent à  $15\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$ . Cette consommation correspond à celle du label Allemand «Passiv Haus » et a été obtenue en optimisant la conductance des parois opaques, les caractéristiques des vitrages ou encore la perméabilité à l'air de l'enveloppe.

#### 2.1.2.1 Présentation de la géométrie commune

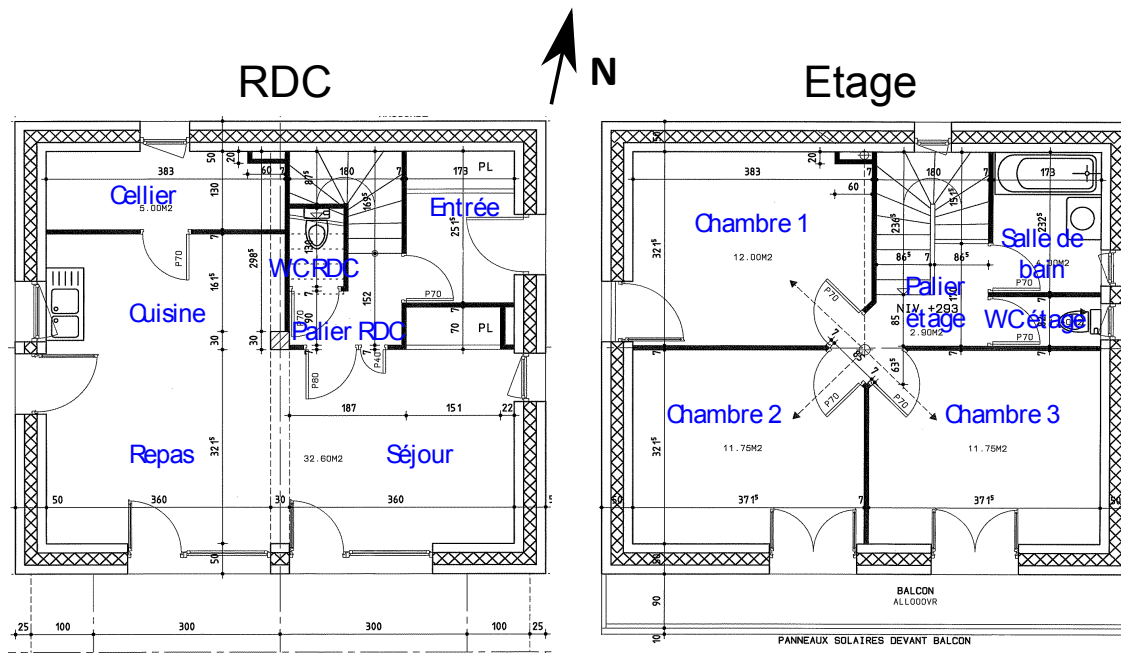
La forme des maisons est compacte et simple et les maisons ont une géométrie intérieure très proche pour pouvoir être comparées. Les maisons expérimentales ont une hauteur sous-plafond de 2,4m à l'étage et de 2,7 au rez-de-chaussée avec les faux plafonds. Les dimensions intérieures sont de 7,5m en longueur et de 6,5m en largeur pour une surface habitable de  $89\text{m}^2$  dont les plans sont sur la figure 2.3.

Les maisons sont bâties sur un vide sanitaire de 0.80m de hauteur et comportent deux niveaux habitables surmontés par des combles indépendants du volume chauffé. L'orientation des façades nord est décalée de  $15,3^\circ$  par rapport à l'axe nord/sud dans le sens antihoraire. La toiture est à deux pans avec une orientation Nord/Sud et un débord de 0,60 m à l'est, à l'ouest et au nord. La façade sud présente de larges baies vitrées protégées du soleil estival par un balcon d'une longueur de 1,3 m de et d'une avancée de toit d'une longueur de 1 m. La façade nord présente deux petites ouvertures équipées de menuiseries à triple vitrage afin de minimiser les pertes thermiques durant la période hivernale. Le vide sanitaire et les combles sont des volumes non chauffés, l'instrumentation dans ces volumes permettra de connaître les conditions limites du volume chauffé. Les surfaces vitrées correspondent à 12% de la surface totale des parois verticales extérieures. La répartition des vitrages pour les 4 orientations correspondent à 28% au Sud, 10% à l'Ouest, 5% à l'Est et 2,5% au Nord.

#### 2.1.2.2 Caractérisation de l'enveloppe

Dans cette étude, on se limitera aux deux premières maisons, Double Mur (I-DM) et Béton Banché (I-BB) sachant que seul le mode constructif diffère entre ces deux

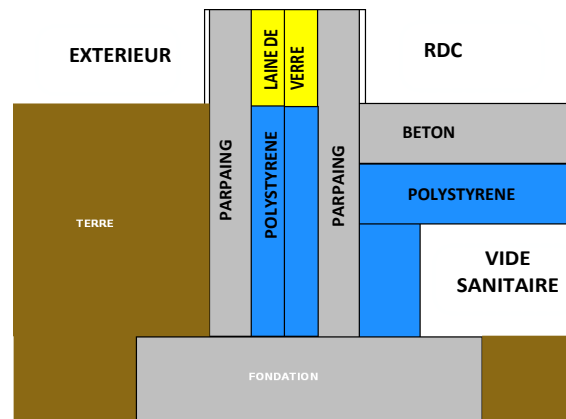




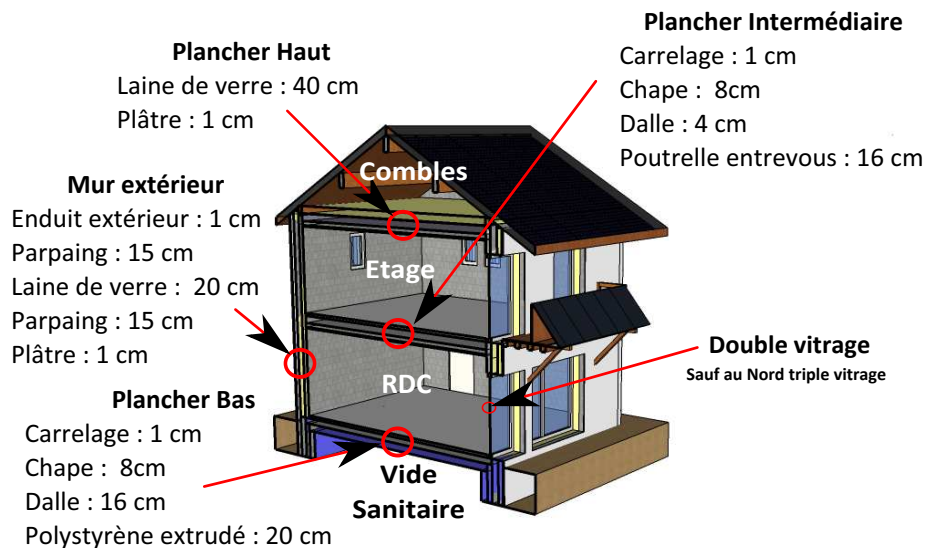
maisons. Il y a une volonté de compromis et de cohérence dans la conception des maisons.

**La maison Double Mur** La première maison de la plate-forme est construite selon un mode constructif à double mur. La figure 2.4 représente le schéma de principe de la maison. Le mur extérieur est constitué de deux murs en aggloméré de béton de 15cm d'épaisseur prenant en «sandwich» une isolation en panneaux semi-rigide de laine de verre à haute densité d'épaisseur 20cm et de conductivité  $0,035W/(m.K)$ . Le vide sanitaire est isolé avec du polystyrène extrudé insensible à l'eau car il est possible que le vide sanitaire soit inondé. Les parois horizontales du vide sanitaire sont isolées par 20cm de polystyrène extrudé de conductivité  $0,029W/(m.K)$ . Le plancher intermédiaire est réalisé en poutrelle hourdis béton non isolé, les combles sont isolés par 40 cm de laine de verre et les murs pignons sont isolés par une épaisseur de 10cm à l'intérieur en plus des 20cm du double-mur. Les principaux matériaux et leurs épaisseurs utilisées pour la construction de la maison I-DM sont représentés sur la figure 2.5. Les propriétés physiques des parois sont en annexe D.

**La maison Béton Banché** La deuxième maison de la plate-forme est construite selon un mode constructif à isolation par l'extérieur. La figure 2.6 représente le schéma de principe de la maison I-BB. Le mur extérieur est constitué de 15cm de béton banché et de 20cm de polystyrène extrudé constitué de deux couches croisées de 10cm. Les autres principes constructifs sont identiques à la maison I-DM. Les principaux matériaux et leurs épaisseurs utilisés pour la construction de la maison I-DM sont représentés sur la figure 2.7. Les propriétés physiques des parois sont en annexe D.



**Figure 2.4** – Liaison plancher bas mur extérieur de la maison I-DM



**Figure 2.5** – Principaux matériaux utilisés dans l'enveloppe de la maison expérimentale I-DM

**Au niveau des menuiseries** Les deux maisons sont identiques. Les menuiseries ont des cadres en PVC dont le coefficient de déperdition thermique égal à  $1,45 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . Les façades Sud, Est et Ouest possèdent des doubles vitrages 4-16-4 faibles émissivités avec remplissage en argon. Ces vitrages ont un coefficient de déperdition thermique égal à  $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  et un facteur solaire annoncé de 0,6. La façade nord est équipée par des triples vitrages 4-12-4-12-4 à faible émissivité avec remplissage en argon. Ces vitrages ont un coefficient de déperdition thermique égal  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  et un facteur solaire égal à 0,45. Les propriétés physiques des menuiseries dont les incertitudes sont limitées sont données en annexe E.

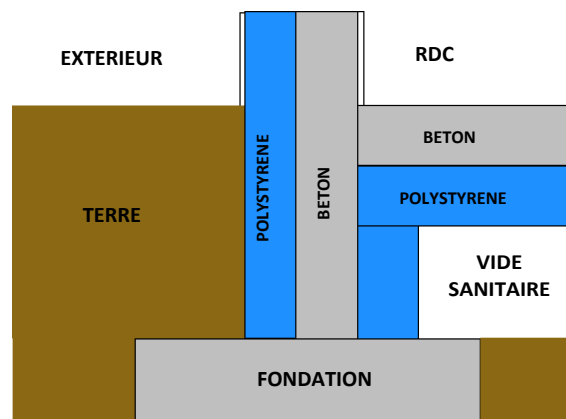


Figure 2.6 – Liaison plancher bas mur extérieur de la maison I-BB

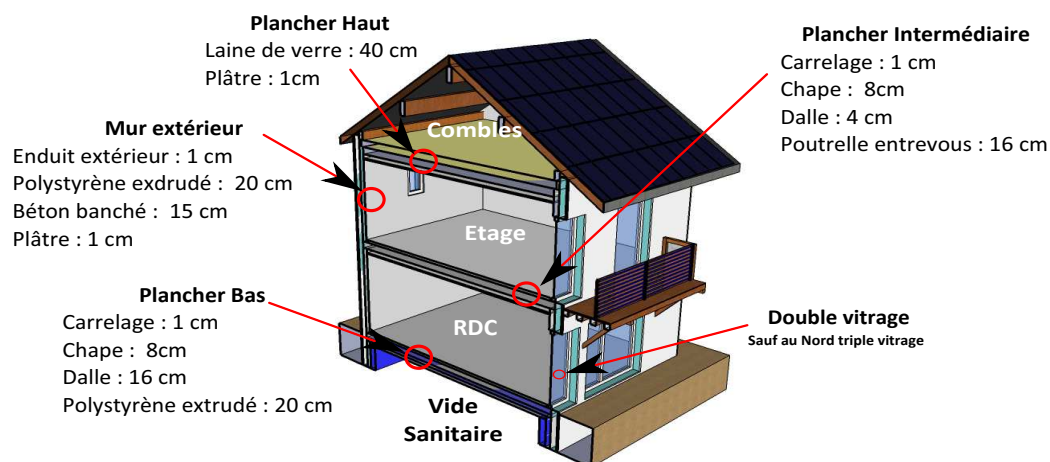


Figure 2.7 – Principaux matériaux utilisés dans l'enveloppe de la maison expérimentale I-BB

### 2.1.2.3 Traitements des points singuliers

Des efforts ont été faits en ce qui concerne l'étanchéité à l'air et le traitement des ponts thermiques. Pour éviter les pertes par infiltration au niveau des dormants des fenêtres, du silicone a été utilisé pour obturer les extrémités et une attention particulière a été apportée au passage de câbles pour ne pas percer les parois verticales. Pour les ponts thermiques, des rupteurs de ponts thermiques ont été utilisés à la liaison toiture/murs pignons ainsi qu'au niveau des coffres de volets roulants. Si les traitements des ponts thermiques sont respectés correctement, il y a peu d'incertitudes sur la conception dues aux ponts thermiques

### 2.1.2.4 Renouvellement d'air et systèmes énergétiques

**Ventilation double flux** Les maisons sont équipées de ventilation double flux Duolix Max. Au niveau de la centrale, il y a deux ventilateurs : l'un pour le circuit d'air neuf et l'autre pour le circuit d'air vicié. Une batterie électrique est présente pour le chauffage et l'échangeur de chaleur est à plaques air/air. Ce dernier permet une récupération de chaleur jusqu'à 92% (donnée constructeur). L'incertitude de ce paramètre sera étudiée par la suite. Un by-pass permet le rafraîchissement par ventilation directe. Il fonctionne en pilotage automatique avec des sondes sur l'air neuf et l'air extrait. La résistance électrique pour la batterie de chauffage est de 1,2kW. Au niveau du réseau aéraulique, les conduits sont en PVC souple en double peau isolés pour la prise d'air et l'extraction. Pour la distribution et la reprise d'air intérieur, il y a des conduits cylindriques acier (diamètres : 80 et 125 mm) et des conduits rigides plats PVC (épaisseur : 55 mm).

**Chauffage** Les besoins en chauffage sont couverts par la ventilation mécanique. Cependant d'autres systèmes peuvent être implantés dans les maisons. Comme par exemple dans la maison I-DM, un plancher chauffant/rafraichissant hydraulique noyé dans la dalle peut être couplé au chauffe eau solaire.

**Panneaux photovoltaïques** Les toitures sont couvertes d'une surface d'environ 40m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques. Pour la maison I-DM, le matériau est du silicium poly cristallin et pour la maison I-BB, les panneaux sont en Cuivre-Indium-Sélénium. Ces installations devraient produire environ 5400 kWh/an. Les valeurs de la production d'énergie par les panneaux photovoltaïques sont fiables voir même pessimistes. En effet les constructeurs de panneaux s'engagent à produire une certaine quantité d'énergie et ce n'est pas dans leur intérêt de surestimer la production.

**Capteurs plans** Sur chaque maison des capteurs plans sont installés. Sur la maison I-DM, il s'agit du modèle BLOCSOL ECS 400, fourni par le fabricant français CLIPSOL composé de 8m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques plans vitrés (dont 4m<sup>2</sup> pour le chauffage). Sur la maison I-BB, on a disposé 3 m<sup>2</sup> (surface des absorbeurs) de capteurs à tubes sous vide installés verticalement sur le balcon au sud, le modèle est Vitosol 200-T, fabriqué par CLIPSOL.

Pour permettre le suivi énergétique dans le temps de la plateforme d'expérimentation, une instrumentation spécifique a été installée sur le site de l'INES qui va faire l'objet du paragraphe suivant.

### 2.1.3 Description de l'expérimentation mise en place

Cette partie traite de l'instrumentation mise en place sur le site de l'INES. Pour reproduire le comportement des maisons dans les codes de simulation, une station météo permet de suivre l'évolution du climat et de nombreux capteurs sont installés dans les maisons, environ 150 dans la I-DM et 100 dans la I-BB.



**Figure 2.8** – Site d’INES et positionnement des stations météo (photo : richard.balloide-photo.com)



(a) Station sur la plate-forme



(b) Station Vantage-Pro sur le lampadaire devant INES

**Figure 2.9** – Les stations météo d’INES

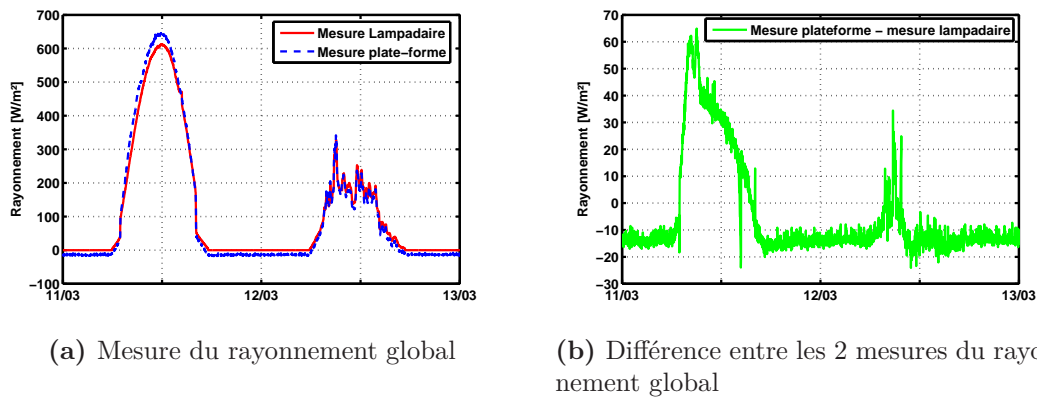
### 2.1.3.1 Les stations météo

Il est important de connaître les conditions météo auxquelles le bâtiment est soumis. Krügera et al. (2008) [34] montrent dans une étude l’influence des résultats de simulation avec des données météo du site voisin. Pour pallier aux désavantages de telles données et connaître au mieux les phénomènes météorologiques locaux, plusieurs appareils de mesure sont implémentés sur le site de l’INES, sur le lampadaire de l’avenue du lac Léman en face du bâtiment Lynx 3 et sur la plate-forme des bâtiments Puma 2 et 3. Les figure 2.8 et 2.9 représentent le site de l’INES avec les deux stations météo. Pour la station sur la plate-forme des éléments environnants comme la cheminée réfléchissante et les armatures en inox perturbent les mesures. Certains appareils sont doublés et situés sur les deux stations permettant une comparaison entre les deux systèmes de mesure.

**La station Vantage-Pro** est placée sur le lampadaire devant les bâtiments d’INES (figure 2.9b) et permet plusieurs mesures météorologiques de température, d’humidité, de pression, de vitesse d’air et de pluviométrie. La température extérieure est mesurée à l’aide d’une sonde placée dans une coque en plastique ventilée naturellement pour éviter que le rayonnement solaire direct ne perturbe les mesures.



**Le rayonnement global** est mesuré à l'aide d'un pyranomètre placé sur chaque station météo. C'est un radiomètre qui permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en Watt par mètre carré [ $\text{W/m}^2$ ] sur un plan. Sur la plate-forme, la technologie utilisée est une thermo-pile, un appareil sensible entre les longueurs d'onde de 300 à 3000 nanomètres. L'incertitude annoncée de ce pyranomètre est de  $\pm 2\%$ . Sur le lampadaire, c'est un pyranomètre composé d'une diode photosensible en silicium, il est sensible entre les longueurs d'onde de 400 à 1100 nanomètres. L'incertitude annoncée de ce pyranomètre est de  $\pm 5\%$ . La figure 2.10 représente le rayonnement global pour les 11 et 12 mars 2011 avec les deux systèmes de mesure situés sur le site d'INES. On observe une différence de 50 à 60  $\text{W/m}^2$  pour le 11 mars qui est une journée ensoleillée, cela fait une incertitude d'environ 8%. L'écart entre les deux types d'appareil est moins marqué pour le 12 mars qui est une journée nuageuse. Pour la mesure située sur la plate-forme, on observe une valeur de  $-10\text{W/m}^2$  la nuit. De plus, il est impossible de quantifier l'impact dû aux éléments proches du pyranomètre situé sur la plate-forme, ces éléments proches devant être plus influents dans le cas de journées ensoleillées. On observe sur la figure 2.10 une cohérence entre les deux mesures tout en considérant une incertitude d'environ 8% entre les deux appareils de mesure.



**Figure 2.10** – Mesure du rayonnement global pour le 11 et 12 mars 2011 à l'INES

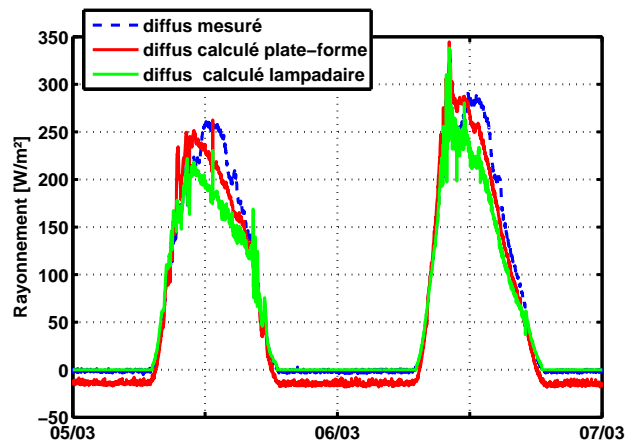
**Le rayonnement solaire direct** est mesuré à l'aide d'un pyréliomètre associé à un système de suivi du soleil. Cet instrument permet de suivre la course du soleil, il comporte une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale aux rayons du soleil par un système automatique. La mesure n'est pas perturbée par des éléments environnants car cet instrument ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil, à l'exclusion de celui issu du ciel ou de la terre. L'incertitude annoncée de ce pyréliomètre est de 2% sur l'intégrale journalière du flux solaire.

**Le rayonnement solaire diffus** est mesuré à l'aide d'un pyranomètre et d'un anneau qui permet de masquer le rayonnement direct. L'ombre de l'anneau couvre

complètement le dôme du pyranomètre mais aussi une partie du rayonnement diffus du ciel et une correction est nécessaire pour compenser cette perte. Pour obtenir une mesure fiable, l’anneau doit être déplacé manuellement tous les deux jours. De plus de nombreux éléments réfléchissent le rayonnement à proximité de cet appareil. Pour pallier à ce désavantage, le rayonnement diffus peut se calculer par l’équation 2.1 grâce au rayonnement global et au rayonnement direct horizontal :

$$I_{diffus} = I_{global} - I_{directnormal} \sin h_{soleil} \quad (2.1)$$

La figure 2.11 représente le rayonnement diffus mesuré et calculé à l’aide des deux pyranomètres disponible sur le site d’INES pour les 5 et 6 mars 2011. Durant ces deux jours, l’anneau était correctement réglé pour masquer la part de rayonnement direct et on observe des écarts pouvant aller jusqu’à 50W/m<sup>2</sup> soit presque 20% d’écart entre les différentes valeurs de rayonnement diffus d’où une incertitude élevée entre ces 3 valeurs de rayonnement diffus. De plus, on constate un pic de rayonnement pour les valeurs mesurées le matin et on peut en conclure que la valeur du rayonnement diffus est sujette à une grande incertitude.



**Figure 2.11** – Rayonnement diffus mesuré et calculé à l’aide des deux pyranomètres disponible sur le site pour le 5 et 6 mars 2011

**Le rayonnement infrarouge** est mesuré à l’aide d’un pyrgéomètre. C’est un radiomètre hémisphérique qui mesure l’éclairement énergétique infrarouge incident à la surface de la terre dans toutes les directions dû au rayonnement tellurique d’origine atmosphérique ou à celui émis et réfléchi par le sol. Cet appareil permet d’estimer le rayonnement net qui intervient dans le calcul du bilan radiatif des surfaces orientées vers le ciel avec une incertitude annoncée de 2% sur l’intégrale journalière du flux solaire.

**L’albédo** est mesuré à l’aide d’un albédomètre, c’est une grandeur sans dimension. C’est le rapport de l’énergie solaire réfléchi par une surface à l’énergie solaire incidente. Les valeurs sont comprises entre 0 et 1, 0 correspondant à la couleur noire pour un corps sans aucune réflexion, et 1 au miroir parfait, diffusant dans toutes les

directions et n'absorbant rien du rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit. L'albédomètre n'a pas d'emplacement fixe sur le site, pour permettre les mesures de l'albédo pour différents sols.

Après avoir présenté les différents appareils permettant la mesure des conditions climatiques et les incertitudes qui y sont liées, une comparaison expérimentation/numérique sera possible. L'expérimentation mise en place dans les maisons INCAS va être maintenant présentée ainsi que toute la problématique liée à la métrologie.

### 2.1.3.2 Métrologie dans les maisons

La plateforme d'expérimentation est équipée de 250 capteurs permettant de suivre l'évolution temporelle des températures d'air, températures de surface, températures radiatives, vitesse d'air, humidité et consommations électriques. La maison I-DM a un niveau d'instrumentation plus élevé avec des capteurs permettant de mesurer les débits d'air dans les gaines de ventilation, les températures d'air à l'entrée et à la sortie de l'échangeur et les températures dans les matériaux pour les façades Sud, Ouest, Nord et Est.

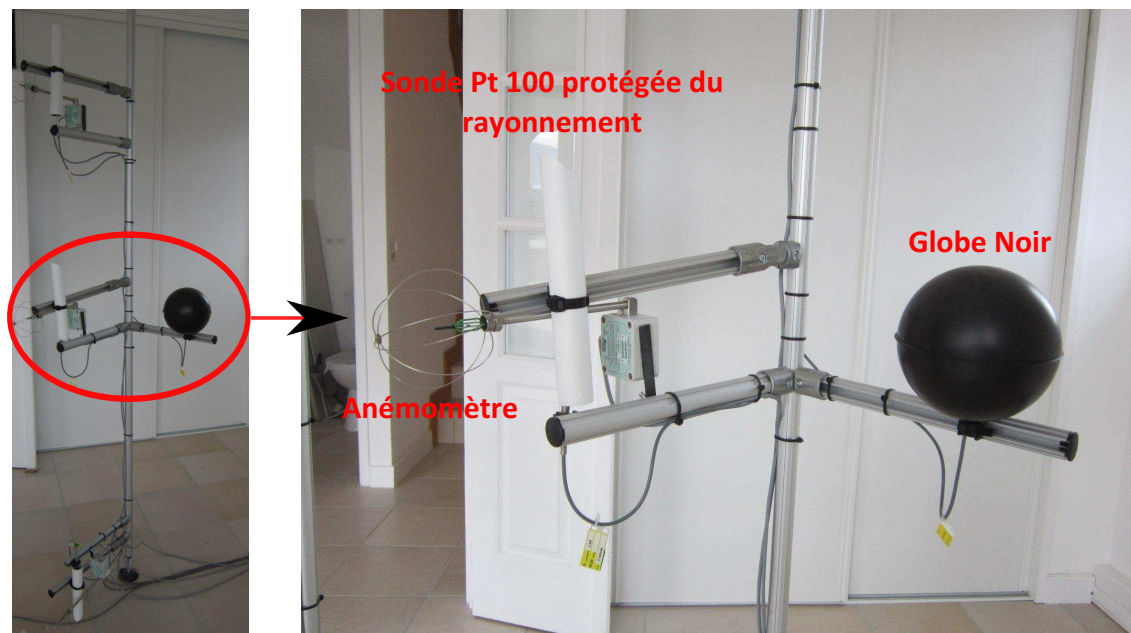
**Les températures d'air** sont mesurées avec des sondes de platine de type Pt100. Les capteurs sont protégés de l'influence du rayonnement par un bouclier métallique cylindrique peint en blanc à l'extérieur et ayant un diamètre suffisant pour ne pas réduire les mouvements de convection d'air autour de la sonde. Les températures d'air sont mesurées dans chacune des pièces, au centre du volume, à une hauteur de 1,10m. Pour chaque niveau (RDC et étage), on mesure la température à 3 hauteurs différentes, à 0,10m du sol (hauteur des chevilles), à 1,10m (hauteur des hanches) et à 1,70m du sol (hauteur de la tête). L'incertitude de mesure annoncée par le distributeur pour une Pt 100 de classe A est de  $\pm 0,35^\circ\text{C}$ .

**Les températures radiatives** sont mesurées à l'aide d'un globe noir placé autour de la sonde de température afin de capter l'ensemble du rayonnement émis par les éléments environnants pour chaque niveau à 1,10 m du sol.

**Les températures de surface de matériaux opaques** sont mesurées à l'aide de thermocouples de type T et K. Pour fixer le capteur aux parois un ruban adhésif ayant une émissivité proche de celle du matériau est utilisé. Il y a un capteur sur chaque orientation de paroi pour chaque niveau à l'intérieur et à l'extérieur. Dans chaque pièce, il y a un capteur qui mesure la température du plancher. Les incertitudes de mesure annoncées par le distributeur sont pour le Thermocouple T (classe 1) de  $\pm 0,50^\circ\text{C}$  et pour le Thermocouple K (classe 1) de  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ . La fiabilité de ces mesures est à remettre en doute car il faut être certain de pouvoir s'affranchir du rayonnement solaire.

**Les températures de surface des vitrages** sont mesurées à l'aide de thermocouples de type T et K. Pour fixer le capteur une colle translucide résistant aux UV et aux variations de température est utilisée. Chaque vitrage a deux capteurs placés





**Figure 2.12** – Mât dans la maison I-DM à l'étage se composant de 3 hauteurs différentes 0,10m, 1,10m et 1,70m du sol avec la température d'air et la vitesse d'air ainsi que la température de rayonnement à 1,10m du sol

au centre côté intérieur et côté extérieur et au total 24 capteurs sont placés sur les vitrages. Comme pour la mesure des températures de surface de matériaux opaques, la fiabilité de ces mesures est à remettre en doute car il faut être certain de pouvoir s'affranchir du rayonnement solaire.

**Les vitesses d'air** sont mesurées à l'aide d'anémomètres à fil chaud. Pour chaque niveau, cette mesure est réalisée à 3 hauteurs différentes, comme pour les températures d'air, à 0,10m du sol (hauteur des chevilles), à 1,10m (hauteur des hanches) et le dernier à 1,70m du sol (hauteur de la tête). Les 3 hauteurs permettront d'identifier différents mouvements d'air dans la pièce. L'incertitude de mesure annoncée par le distributeur est de  $\pm 0,05$  m/s pour une vitesse d'air de 1,00m/s. Ces anémomètres ne sont pas assez précis pour mesurer les mouvements d'air convectifs éventuels dans une pièce, ils sont plus adaptés à la mesure de vitesses d'air élevées à l'occasion de l'ouverture d'une fenêtre.

**Les débits d'air** dans le réseau de ventilation sont mesurées à l'aide de débitmètres à Ultrason. Le principe de mesure repose sur le temps de parcours d'une onde émise et réfléchié dans un fluide en mouvement. Pour effectuer une mesure précise la longueur de la gaine doit être supérieure à 10 mètres en aval et 10 mètres en amont et la mesure de débit est donc sujette à de nombreuses incertitudes. L'incertitude de mesure est estimée à  $\pm 8,5\%$  de la mesure mais cette incertitude ne tient pas compte de la longueur de gaine insuffisante. D'autres mesures de débit d'air sont également effectuées régulièrement à l'aide de balomètre. Ces débitmètres permettent de confirmer les mesures à ultrason. Un balomètre permet la mesure du

## 2.2 La problématique des incertitudes sur l'exemple de la plateforme d'expérimentation

---

débit volumétrique des filtres, grilles et diffuseurs, en utilisant la mesure de pression différentielle. Cet appareil a une incertitude d'environ 10%.

**L'humidité** est mesurée à chaque niveau de la maison dans le salon pour le RDC et sur le palier à l'étage. L'incertitude du capteur de mesure est de  $\pm 0,5\%$ HR de 10 à 90%HR.

**Les mesures électriques** sont effectuées par des capteurs qui mesurent les consommations et productions électriques (puissance active, courant, tension) de chaque maison en continu ou alternatif. Les incertitudes annoncées par le distributeur sur les mesures en courant continu sont de 1,0% et de 0,50% pour le courant alternatif.

**Les mesures d'humidité et de température dans les matériaux pour la I-DM** sont effectuées par un capteur capacitif polymère composé d'un circuit intégré capable de mesurer la température et l'humidité relative. Son faible encombrement permet de l'introduire dans les matériaux pour faire des mesures localisées. Pour chaque niveau et façade, un parpaing se retire permettant d'accéder aux capteurs qui sont implantés dans l'isolant à 0, 3, 9, 15 et 18 centimètres, ils mesurent la température et l'humidité. L'incertitude pour la valeur de l'humidité est de  $\pm 6,0\%$ HR de 0,0 à 100,0%HR pour une température évoluant entre -10 et 50°C et pour la mesure de la température l'incertitude est de  $\pm 1,2^\circ\text{C}$ .

Dans ce paragraphe, on a listé l'ensemble des types de capteurs présents dans les maisons qui permettent de suivre le comportement thermique des maisons. Les questions auxquelles on va essayer de répondre maintenant sont les suivantes : quels sont les résultats de mesure des maisons durant une période définie ? Les mesures sont-elles fiables ? Le niveau d'instrumentation des maisons permet-il de définir une plage d'incertitude des mesures permettant de pouvoir effectuer la comparaison avec la prévision ?

## 2.2 La problématique des incertitudes sur l'exemple de la plateforme d'expérimentation

L'étude des résultats de la métrologie permet d'analyser le comportement thermique des maisons I-DM et I-BB. La cohérence des résultats des mesures entre les maisons I-DM et I-BB prouve la bonne valeur qualitative des mesures. Les premières mesures sont disponibles depuis juillet 2010 et dans le cadre de ce travail, on s'intéressera aux mois de février et de mars 2011. Les bâtiments expérimentaux ne sont pas habités, néanmoins les charges internes dégagées par les appareils de mesure correspondent à des puissances équivalentes à une famille de 4 personnes.

### 2.2.1 Évaluation de la fiabilité des données sur deux bâtiments suite à un arrêt du chauffage

Dans cette partie, on s’intéresse aux mesures de température d’air et aux mesures de puissance. La figure 2.13 présente le scénario appliqué aux deux maisons pendant la période d’étude ainsi que la moyenne de la température extérieure journalière et la moyenne du rayonnement direct journalier. La figure 2.14 représente la température dans la zone du repas et la chambre 2 et les puissances de chauffage des maisons I-DM et I-BB du 1er février au 31 mars. Durant cette période toutes les portes intérieures des maisons étaient ouvertes. Le choix de la zone repas ainsi que la chambre 2 permet de comparer les températures entre les niveaux, sachant que ces capteurs sont représentatifs de chaque niveau (voir en 2.2.2).

Sur la figure 2.14, on observe le changement de scénario les mois de février et de mars. Durant les périodes d’arrêt du chauffage, les températures d’air intérieures ne sont pas descendues sous la consigne hors gel de 11°C et la résistance ne s’est pas mise en marche. Pour la figure 2.14b c’est la moyenne des puissances journalières qui est représentée. Elle est différente entre les deux maisons : pour la maison I-DM la puissance maximale est d’environ 1,13kW et pour la maison I-BB elle est d’environ 1,19kW.

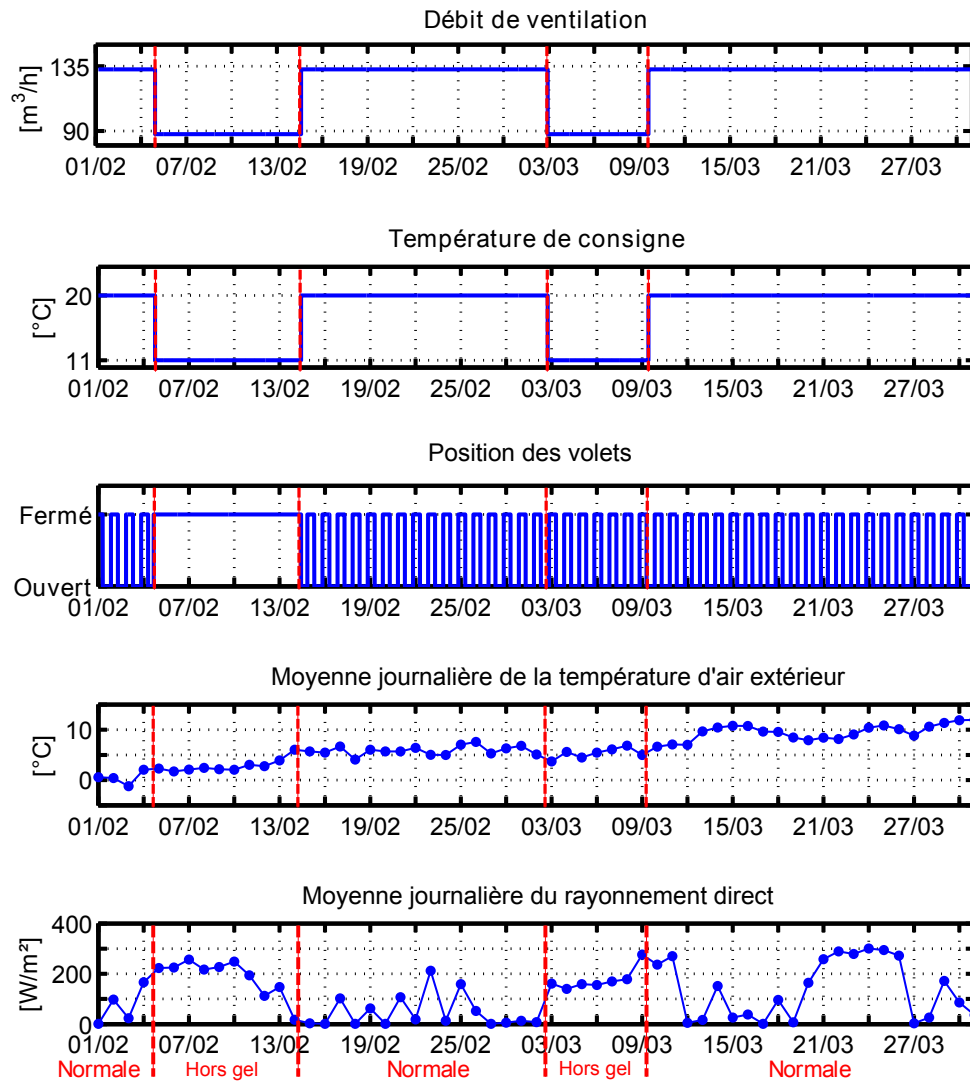
Sur la figure 2.14, on observe différents écarts soit de température entre les niveaux et entre les maisons soit de puissance entre les niveaux. Différentes sources d’incertitudes peuvent être à l’origine de ces écarts :

- les incertitudes sur le champ de température
- les incertitudes concernant les sollicitations extérieures
- les incertitudes concernant la distribution aéraulique

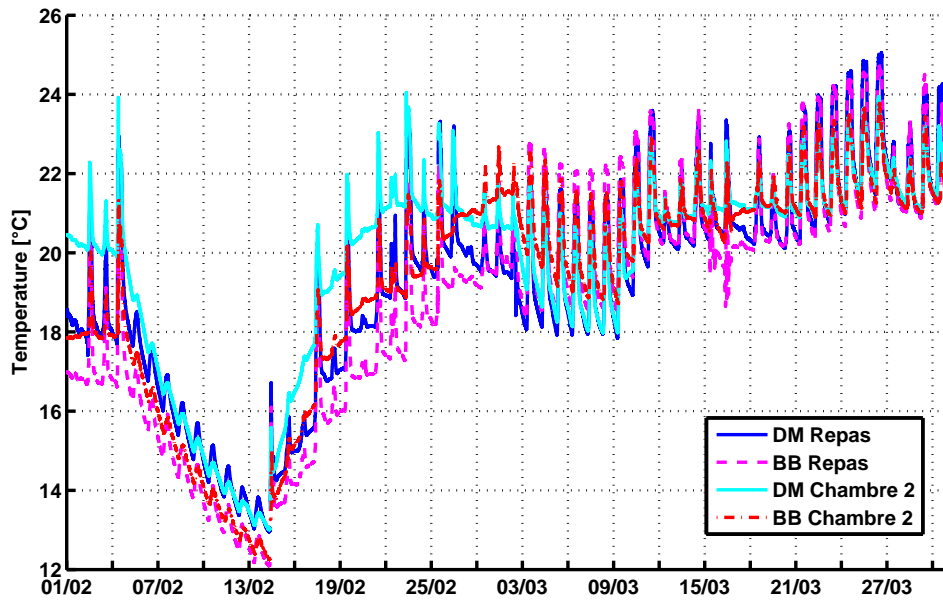
Dans la suite, ces différentes sources d’incertitudes seront explicitées.

## 2.2 La problématique des incertitudes sur l'exemple de la plateforme d'expérimentation

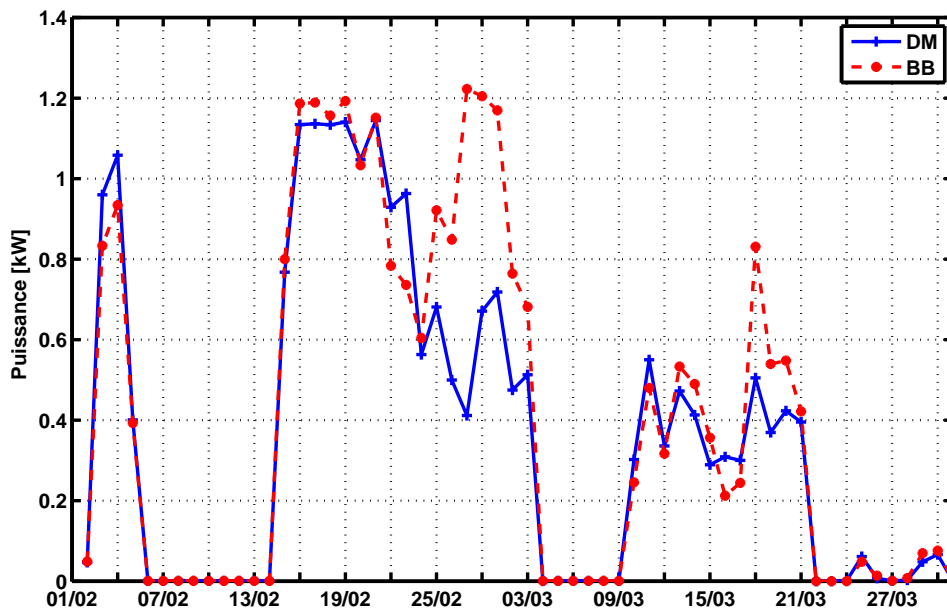
---



**Figure 2.13** – Scénario du mois de février et de mars 2011 des maisons I-DM et I-BB

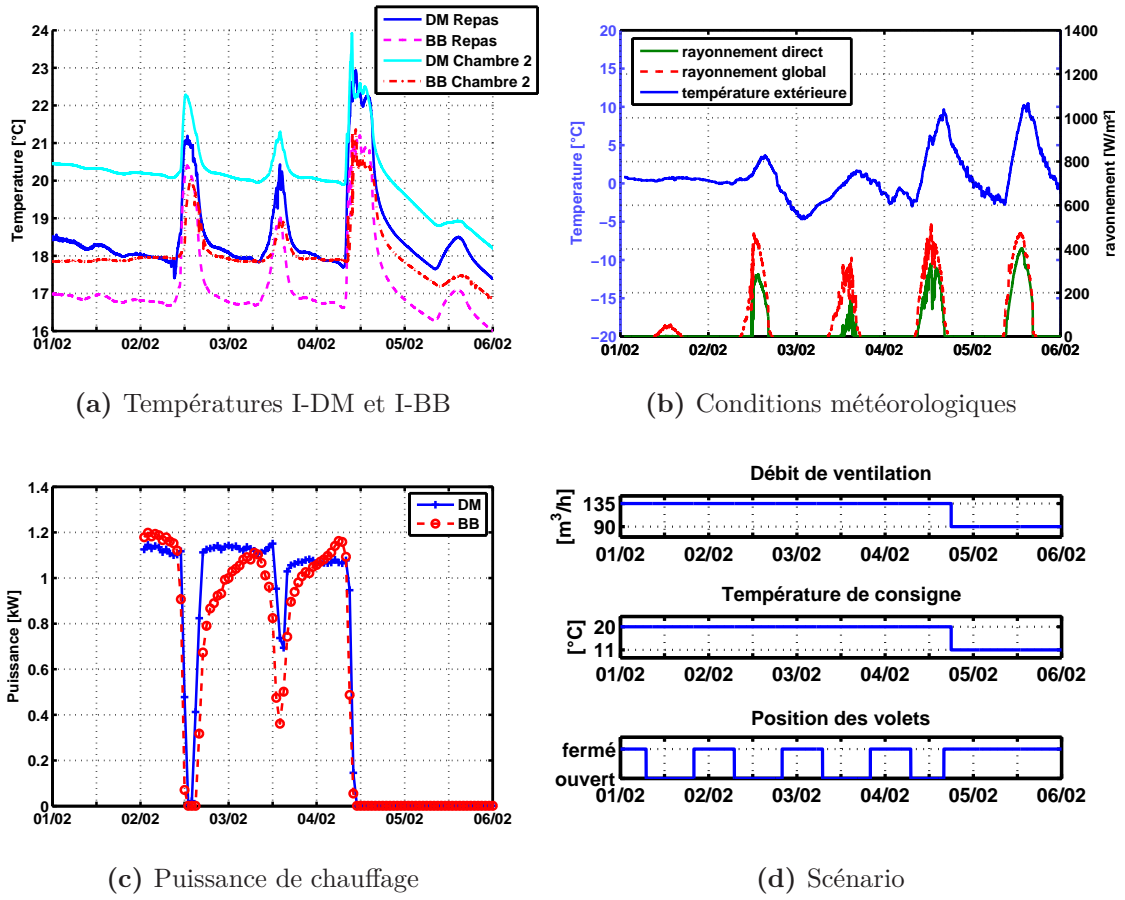


(a) Température d'air sec au RDC et à l'étage des maisons I-DM et I-BB



(b) Puissance de chauffage des maisons I-DM et I-BB

**Figure 2.14** – Température d'air et puissance des maisons I-DM et I-BB du 1er février au 31 mars



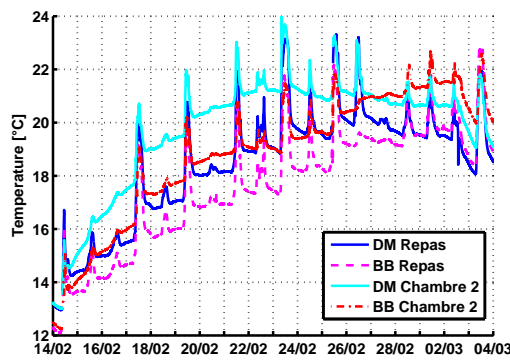
**Figure 2.15** – Température d’air et puissance de chauffage dans les maisons I-DM et I-BB, météo et scénario du 1<sup>er</sup> au 5 février

### 2.2.2 Incertitudes sur les champ de température

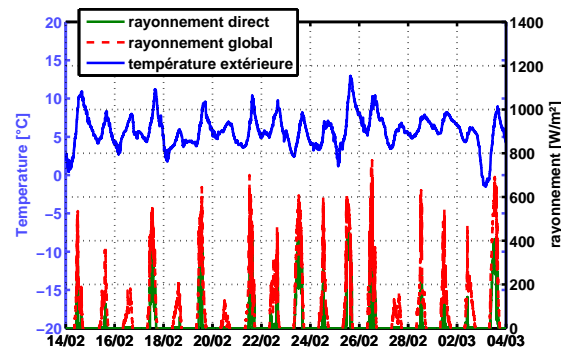
Pour identifier les incertitudes sur le champ de température deux périodes ont été étudiées. Les figures 2.15 et 2.16 présentent les températures d’air au RDC et à l’étage des maisons I-DM et I-BB, la puissance de chauffage, la météo et les scénarios respectivement pour les périodes du 1<sup>er</sup> au 5 février et du 14 février au 3 mars.

**Gradient de température dans les maisons** On constate des écarts de température entre les niveaux du RDC et de l’étage, dans chaque maison : 2°C pour la I-DM et 1°C pour la I-BB pour la période du 1<sup>er</sup> au 5 février. Les écarts sont plus importants pour la période du 14 février au 3 mars. Durant cette période, l’air chaud circule dans les faux plafonds à des températures avoisinant 30°C (voir 2.2.4) avec une température moyenne de la zone de 12°C. Les raisons de ces écarts peuvent être la stratification de l’air ou une mauvaise répartition des débits aérauliques entre les deux étages.

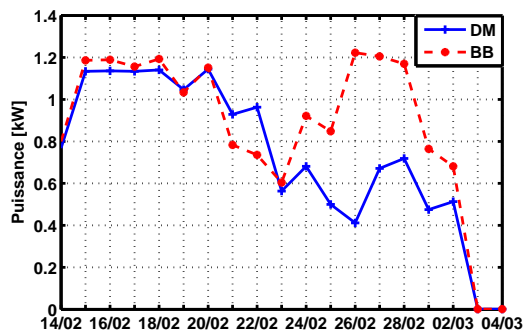
Dans les maisons, toutes les portes intérieures étaient ouvertes et l’air circule par la cage d’escalier entre le RDC et l’étage. De nombreux travaux ont porté sur la



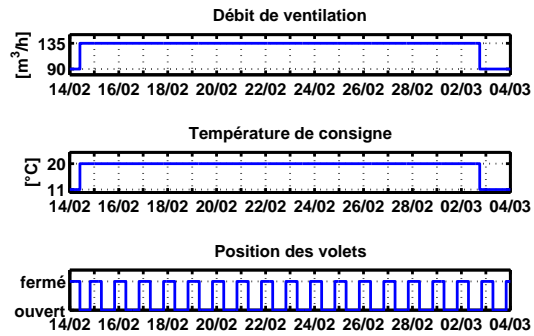
(a) Températures I-DM et I-BB



(b) Conditions météorologiques



(c) Puissance de chauffage



(d) Scénario

**Figure 2.16** – Température d'air dans les maisons I-DM et I-BB et météo du 14 février au 3 mars



quantification du transfert d'air entre zones : la tâche 12 de l'IEA [10] s'est intéressée au transfert d'air dans un atrium et Peppes A.A. et al (2002)[52] se sont intéressés au transfert d'air dans les cages d'escalier. Ces travaux montrent la difficulté de la quantification du débit d'air circulant entre deux niveaux. L'écart de température entre les niveaux peut être dû au système de ventilation à cause d'une répartition non homogène du débit de ventilation entre le RDC et l'étage. Pour mesurer le débit soufflé et aspiré dans la maison, deux bouches d'aspiration ont dû être condamnées (voir 2.2.4). De plus après installation des débitmètres, les fuites dans le réseau de ventilation étaient conséquentes. Les gaines de ventilation sont des conduites rigides rectangulaires avec des raccords peu étanches. Pour améliorer l'étanchéité du système, chaque raccord de gaine de ventilation a été étanchéifié. Ces modifications et améliorations effectuées après installation ont pu modifier l'équilibrage du système créant des répartitions de débits différentes entre les niveaux dans les maisons.

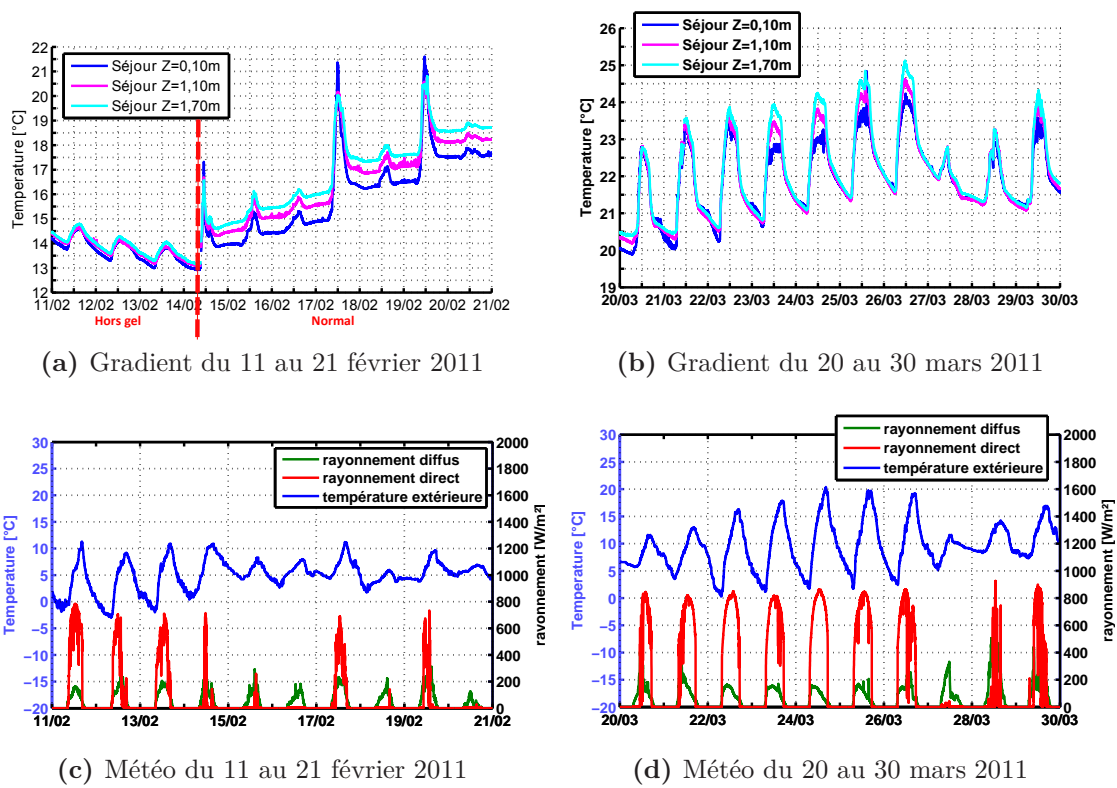
**Gradient de température entre maisons** On constate un écart de température entre les maisons : 2°C pour le RDC et 1°C pour l'étage entre la I-DM et la I-BB. Au 1<sup>er</sup> février la température de consigne de la maison I-DM était d'environ 18°C tandis que celle de la I-BB de 17°C. Cet écart illustre en partie l'incertitude sur la température de consigne. En effet, la consigne de chauffage est réglée manuellement à l'aide d'un potentiomètre dont les valeurs sont indiquées sur un adhésif. Les sondes régulant la consigne sont placées au même endroit dans la zone repas sur la cloison. Deux actions ont été prises pour pallier à cette incertitude. Dans un premier temps, ajuster le potentiomètre afin d'avoir les mêmes températures au RDC de chaque maison (voir la période du 14 février au 3 mars). Dans un second temps, le potentiomètre manuel a été remplacé par un thermostat numérique (hors période d'étude).

Après avoir observé les différents gradients de température entre les maisons et entre le RDC et l'étage dans les maisons, on va regarder s'il existe un gradient de température dans une même pièce entre le plancher et le plafond.

**Gradient de température dans une pièce** La figure 2.17 s'intéresse au gradient de température mesuré dans la zone du séjour de la maison I-DM à trois niveaux différents et aux conditions météorologiques correspondant aux périodes du 11 au 21 février et du 20 au 30 mars. On observe qu'il n'y a pas de gradient thermique du 11 au 13 février, c'est le scénario hors gel ( ventilation diminuée et volets fermés toute la journée). A partir du 14 février, il y a une différence de température de près de 1°C entre la mesure à 0,1m du sol et celle à 1,70m. Pour la semaine en mars, un gradient de température de 1°C est observé en milieu de journée pour les journées du 23 au 26 mars. La plage d'incertitude de la mesure du gradient thermique est de 1°C entre le sol et le plafond.

Les différents gradients thermiques étudiés sont dus au mouvement d'air. Un système de ventilation mécanique à double flux est installé dans les maisons INCAS et permet également le chauffage grâce à une résistance électrique positionnée après l'échangeur. Ce système peut être à l'origine des gradients thermiques dans les maisons. On va maintenant s'intéresser aux incertitudes concernant les sollicitations





**Figure 2.17** – Gradient de température au RDC de la maison I-DM et conditions météorologiques pour 10 jours en février et 10 jours en mars

extérieures.

### 2.2.3 Incertitudes concernant les sollicitations extérieures

Les puissances de chauffage et le rayonnement solaire sont des sollicitations responsables des perturbations thermiques des maisons I-DM et I-BB.

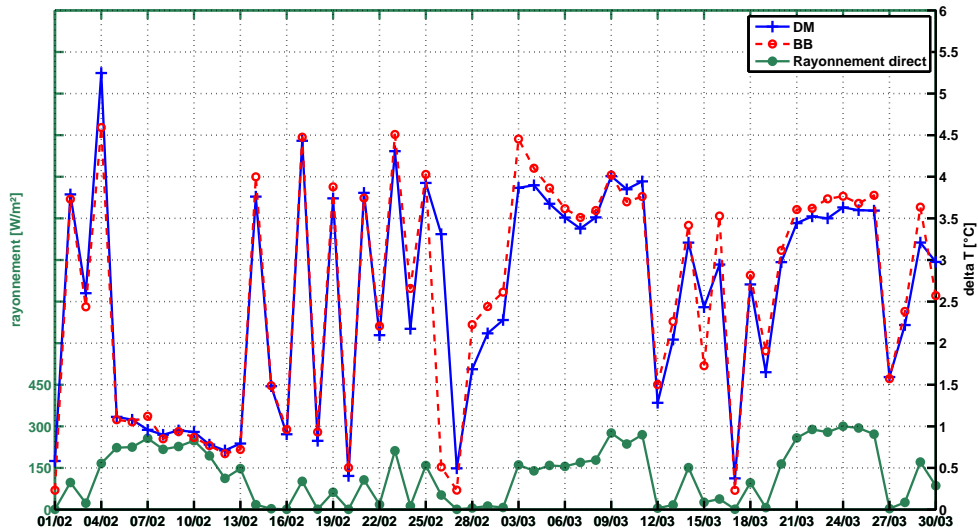
**Puissance de chauffage** Pour la période du 14 février au 3 mars, on constate sur la figure 2.16 :

- Les résistances électriques sont au maximum de leur puissance durant 5 jours sauf pour le 19 février. La journée du 19 février est ensoleillée, un pic de 3°C de température est observé par rapport à la nuit du 18 au 19 février pour le niveau du RDC. En cours de journée, la température d'air dans les maisons augmente jusqu'à atteindre la température de consigne, les résistances s'éteignent et se rallument en fin de journée dès que la température d'air est inférieure à la consigne.
- Du 14 au 20 février, les résistances sont au maximum de leur puissance. Les mesures sont différentes entre elles. Pour la I-DM, la mesure est de 1,15kW et pour la I-BB de 1,2kW, soit un écart d'environ 4%. Cet écart peut s'expliquer soit par les incertitudes de mesure, soit par la différence entre les résistances (fabrication) et nous n'avons pas encore été capables de conclure sur ce point.
- La puissance de chauffage de la I-BB est supérieure à la I-DM du 26 février au 1<sup>er</sup> mars. Pour obtenir une température d'environ 20°C homogène entre les maisons, la température de consigne de la I-BB a été augmentée le 26 février. Cette modification de la température de consigne a augmenté la demande de puissance du 26 février au 1<sup>er</sup> mars pour la I-BB. La difficulté de réglage de la température de consigne entre les deux maisons engendre une incertitude sur la comparaison des résultats des besoins de chauffage entre les maisons.

**Rayonnement solaire** Sur les figures 2.15 et 2.16, on peut observer des augmentations de température journalière. De nombreux paramètres ont de l'influence sur la température d'air mais le principal paramètre influent est le rayonnement direct. Pour essayer de quantifier l'augmentation de la température journalière en fonction du rayonnement, on s'intéresse à la figure 2.18 représentant l'amplitude de température du RDC par maison ainsi que le rayonnement direct journalier du 1<sup>er</sup> février au 30 mars. On remarque que l'amplitude de température journalière est semblable entre les deux maisons. Si le rayonnement direct journalier est supérieur à 150W/m<sup>2</sup>, l'amplitude est supérieure à 3°C dans le cas où les volets sont ouverts la journée et de l'ordre de 1°C lorsque les volets sont fermés.

### 2.2.4 Incertitudes concernant la distribution aéraulique

**Efficacité de la ventilation double flux** On s'est intéressé au bon fonctionnement de la ventilation et plus particulièrement de l'échangeur de la ventilation



**Figure 2.18** – Différence de température journalière des maisons I-DM et I-BB pour le RDC et rayonnement direct journalier du 1<sup>er</sup> février au 30 mars

double flux. La figure 2.19 représente le positionnement du réseau de ventilation et des bouches d’insufflation et d’extraction. Les bouches d’insufflation sont dans les pièces repas, séjour, chambre 1, 2 et 3, les bouches d’extraction sont dans la cuisine, le cellier, les toilettes au RDC et à l’étage et la salle de bain. Les bouches du cellier et des toilettes au RDC ont été condamnées car il n’était pas possible de mesurer le débit aspiré dans ces gaines.

La figure 2.20 représente le schéma de l’échangeur et la figure 2.21 présente les températures d’air au niveau des deux entrées et deux sorties de l’échangeur. L’aspiration par ventilation de l’air neuf correspond à la température extérieure (point 3) et l’aspiration par ventilation d’air vicié correspond à la température intérieure des maisons (point 5). Le soufflage par ventilation air neuf correspond à l’air réchauffé grâce à l’échangeur (point 2). Il y a très peu d’écart de température entre l’aspiration air vicié et le soufflage air neuf ce qui démontre un rendement élevé de l’échangeur. Avec ces mesures, on peut déterminer l’efficacité de l’échangeur.

L’efficacité d’un échangeur se définit comme le rapport du flux effectivement transféré dans l’échangeur au flux de chaleur maximal qui serait transféré dans les conditions de température d’entrée des deux fluides dans un échangeur tubulaire de longueur infinie fonctionnant à contre-courant :

$$\eta = \frac{\varphi}{\varphi_{max}} \quad (2.2)$$

Dans notre cas, on a

$$\varphi = (\dot{m}Cp)_{an}(T_2 - T_3) \quad \varphi_{max} = (\dot{m}Cp)_{av}(T_5 - T_3)$$

## 2.2 La problématique des incertitudes sur l'exemple de la plateforme d'expérimentation

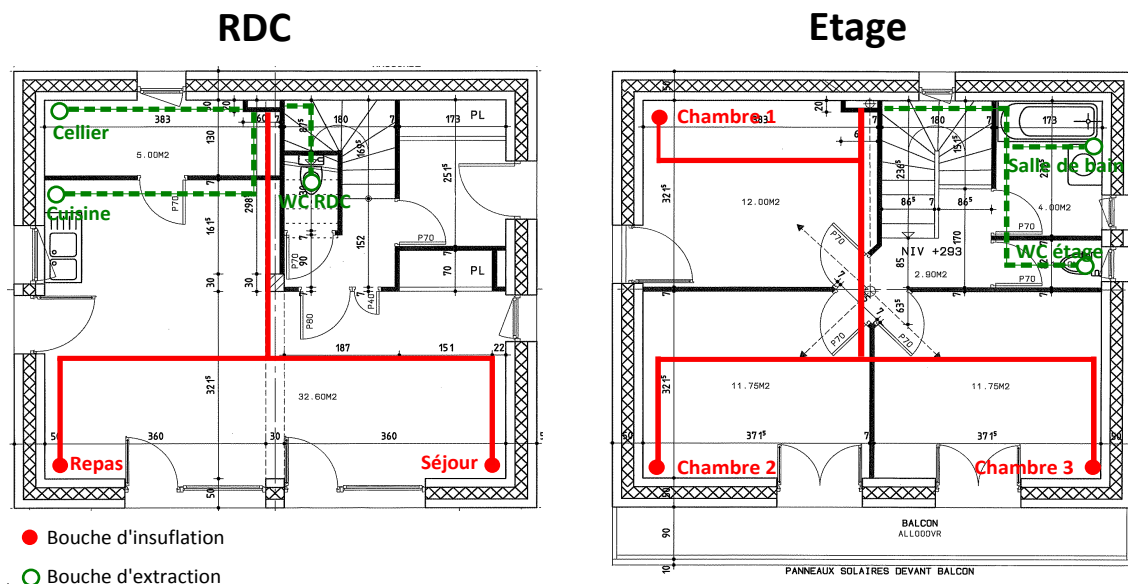


Figure 2.19 – Réseau de ventilation

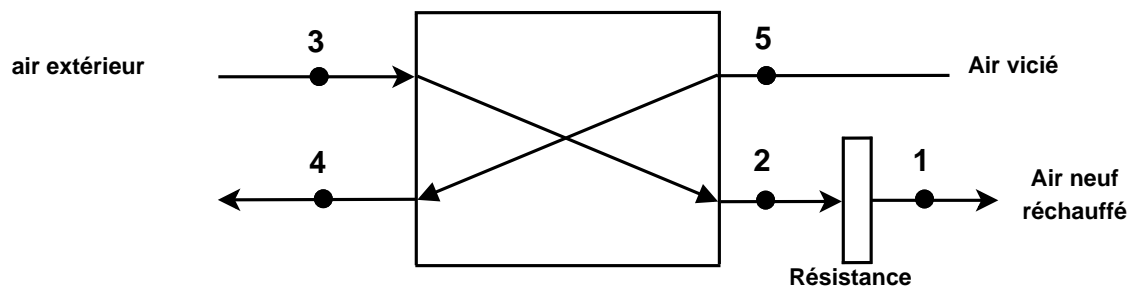
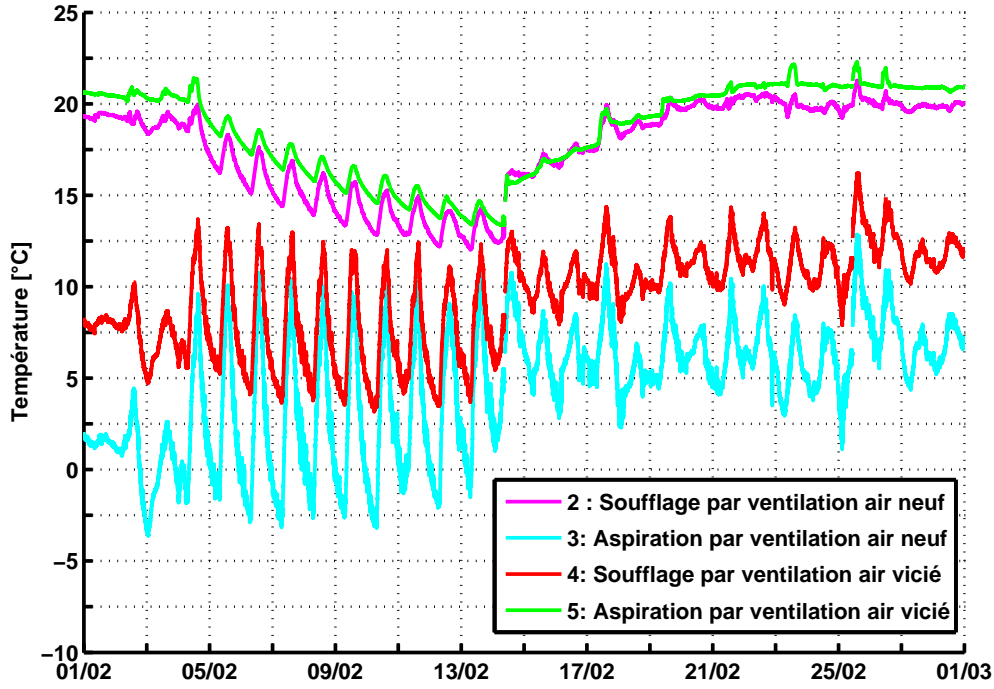


Figure 2.20 – Schéma de l'échangeur



**Figure 2.21** – Température d'air aux extrémités de l'échangeur pour le mois de février 2011

avec an = air neuf et av = air vicié.

Si on considère l'égalité des débits :  $(\dot{m}Cp)_{an} = (\dot{m}Cp)_{av}$ , l'efficacité est égale à :

$$\eta = \frac{T_2 - T_3}{T_5 - T_3} \quad (2.3)$$

La figure 2.22 représente l'efficacité de l'échangeur pour le mois de février comprise entre 0,85 et 0,95 du 1<sup>er</sup> au 13 février. A partir du 14 février l'efficacité est supérieure à 1 car la température de soufflage de l'air neuf est supérieure à la température d'aspiration de l'air vicié ce qui est physiquement impossible et signifie qu'il y a des erreurs de mesure. A partir du 14 février, la résistance fonctionne et le capteur de température du soufflage de l'air neuf est proche de la résistance qui peut rayonner et donc augmenter la mesure. Si la mesure de température de soufflage est influencée par la résistance, le calcul de l'efficacité est incertain dès lors que la résistance fonctionne. La période hors gel du 5 au 13 février est une période de non fonctionnement de la résistance avec une valeur de l'efficacité comprise entre 0,87 et 0,92. Le constructeur annonce un rendement de son échangeur de 0,92, cette valeur dépendant fortement des conditions dans lesquelles le système de ventilation fonctionne. Dans notre cas, pour le scénario du mois de février on a une efficacité de l'ordre de 0,9.

Avec trois points de mesure il est possible de calculer l'efficacité de l'échangeur. Néanmoins l'incertitude des mesures de température d'air aux entrée et sortie de l'échangeur doit être pris en compte. Dans notre cas, il y a environ  $\pm 5\%$  d'incertitude.

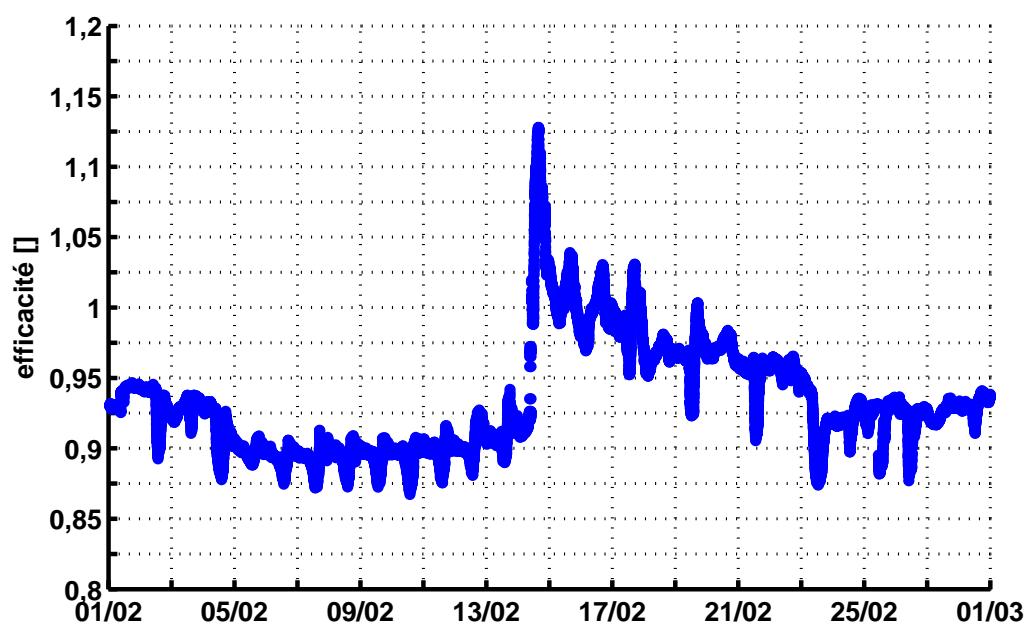
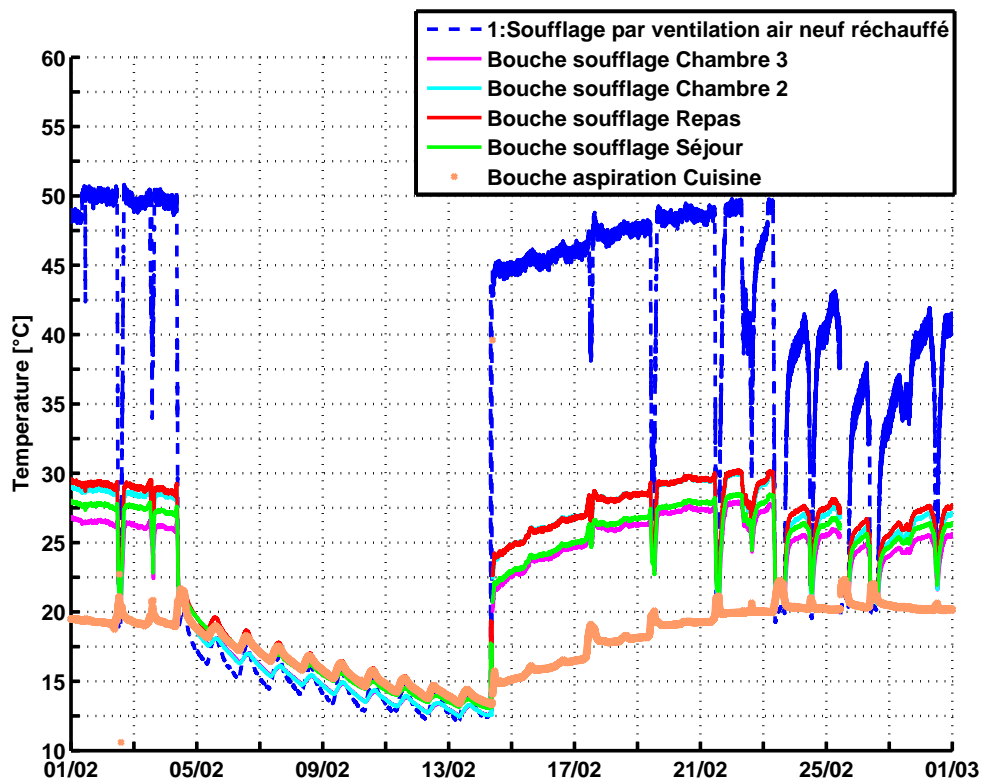


Figure 2.22 – Efficacité de l'échangeur

Dans le cas de bâtiment à faible consommation, l'efficacité de l'échangeur est toute aussi importante que l'étanchéité du réseau de ventilation.

**Étanchéité à l'air du réseau aéraulique** Sur la figure 2.23 sont représentées les températures des bouches de soufflage et la température de l'air réchauffé juste après la résistance. Le capteur mesurant la température d'air neuf réchauffé permet de connaître l'état de fonctionnement de la résistance. Début février la température après la résistance électrique est d'environ 50°C et les températures de soufflage sont comprises entre 25 et 30°C. Il y a un écart d'environ 20°C entre la température après la résistance et les bouches de soufflage. Une hypothèse pour cet écart est que le capteur après la résistance soit influencé par le rayonnement de la résistance. Mais cette augmentation ne peut avoir comme effet qu'une variation de quelques degrés. Une seconde hypothèse concerne les pertes sur le réseau. Les gaines de ventilation sont des conduites rigides rectangulaires extra-plates. Au vu de ces résultats l'étanchéité du réseau présente des défauts. Mais les pertes du réseau restent dans le volume chauffé et il n'y a donc pas de perte quant à la quantité d'énergie fournie par la résistance et l'échangeur au volume total de la maison.

**Mesure des débits d'air** La figure 2.24 représente la mesure des débits à l'aide des débitmètres à ultrason du 1<sup>er</sup> au 4 mars. Sur cette figure est visible le changement de scénario avec la baisse du débit le 2 mars. La mesure du débit de l'aspiration air vicié au RDC ne fonctionne pas durant cette période. La mesure du débit de l'aspiration air vicié de l'étage est perturbée lorsque la consigne est de 135m<sup>3</sup>/h. Lorsque la consigne est de 135m<sup>3</sup>/h, le débit soufflé mesuré dans la maison est d'environ 130m<sup>3</sup>/h et lorsque la consigne est de 90m<sup>3</sup>/h, le débit soufflé mesuré dans la mai-



**Figure 2.23** – Température d'air du réseau de ventilation pour le mois de février 2011

son est de  $80\text{m}^3/\text{h}$ . La figure 2.25 représente les débits les 13 et 14 avril avec la consigne de  $135\text{m}^3/\text{h}$ . Les débits varient au cours de journée et ils augmentent durant la période d'ensoleillement.

Il y a de nombreuses incertitudes sur ces mesures car la longueur de la gaine n'est pas suffisante en aval et en amont des débitmètres pour avoir une mesure fiable. Des mesures ont été effectuées avec un balomètre le 2 février, les résultats des mesures des débits aux différentes bouches sont dans le tableau 2.1.

Pour comparer les deux types de mesure, on a calculé les moyennes de mesure avec les débitmètres à ultrason de la période du 13 et 14 avril. La consigne du débit de  $135\text{m}^3/\text{h}$  était la même entre les deux périodes. La figure 2.26 représente le diagramme de comparaison. On observe des écarts non négligeables entre les deux méthodes de mesure. Par ces différences de résultat, on voit toute la difficulté à mesurer le débit d'air.

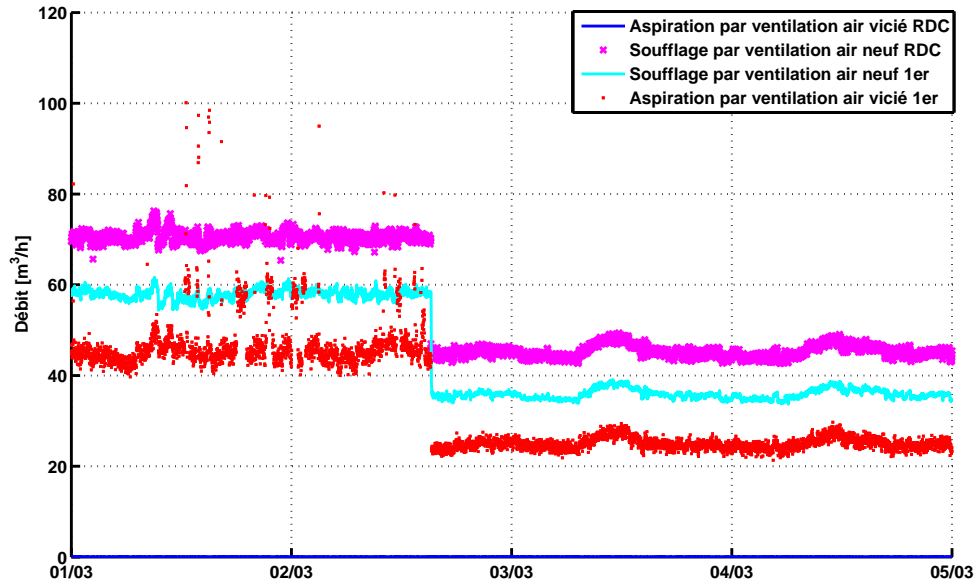


Figure 2.24 – Mesure du débit pour la maison I-DM du 1<sup>er</sup> au 4 mars

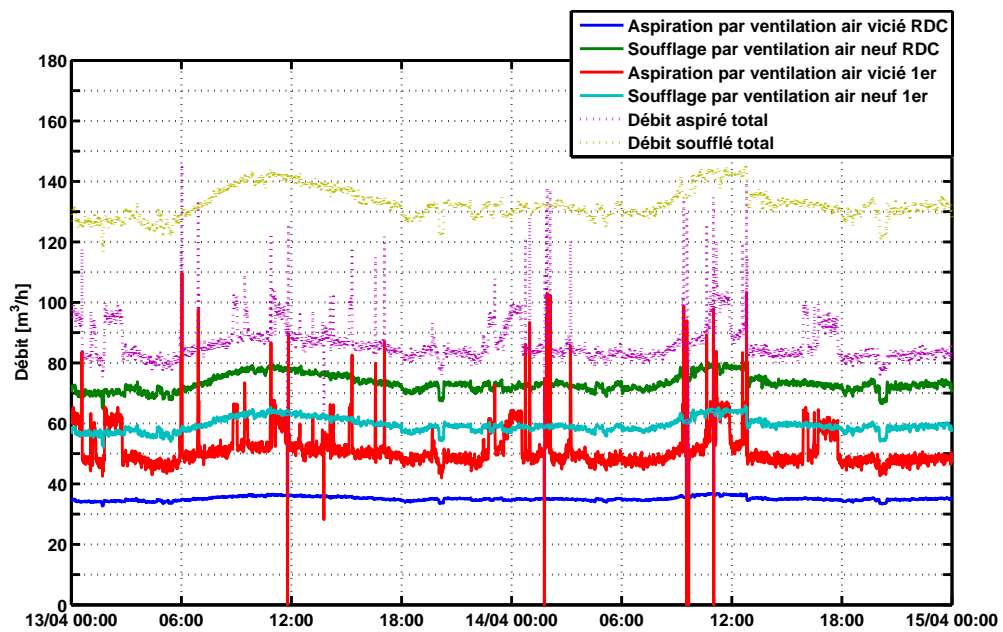
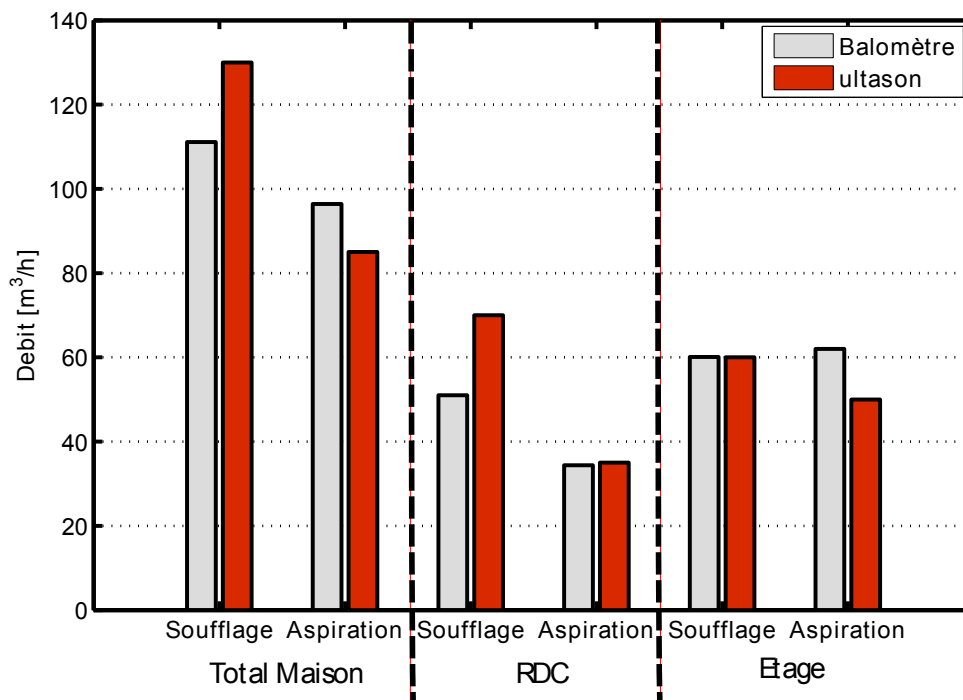


Figure 2.25 – Mesure du débit pour la maison I-DM le 13 et 14 avril



Mode	Pièce	balomètre [m³/h]
Soufflage	Repas	25,0
Soufflage	Séjour	26,0
Soufflage	Chambre 3	21,1
Soufflage	Chambre 2	20,9
Soufflage	Chambre 1	18,1
Aspiration	Cuisine	34,4
Aspiration	WC étage	30,9
Aspiration	Salle de bain	31,1
Aspiration	WC RDC	Condamnée
Aspiration	Cellier	Condamnée
Soufflage	Total maison	111,1
Aspiration	Total maison	96,4

**Table 2.1** – Mesure du débit par le balomètre effectuée le 2 février



**Figure 2.26** – Comparaison des mesures de débit par le balomètre et le débitmètre à ultrason

### 2.2.5 Détermination d'une plage d'incertitude sur la mesure de la température d'air

Cette partie concerne l'étude de tous les capteurs de température d'air placés dans la maison I-DM et positionnés à une hauteur de 1,10 mètre par rapport au sol. On cherche à déterminer une plage d'incertitude par niveau de la température d'air et pour cela trois journées ont été choisies : le 12 février, le 15 février et le 25 mars. Durant ces trois jours, il n'y a aucune intervention dans les maisons et les scénarios sont différents durant les trois jours : le 12 février c'est un scénario hors gel (volets fermés toute la journée), le 15 février est un scénario de remise en chauffe des maisons et le 25 mars est un scénario dit normal, la température est en évolution libre, la puissance de la résistance électrique est faible. Les figures 2.28, 2.29 et 2.30 représentent les capteurs de température d'air à 1,10 mètre de hauteur pour chaque niveau ainsi que les conditions météorologiques journalières respectivement pour les journées du 12 février, 15 février et 25 mars. La figure 2.27 montre l'emplacement des différents capteurs dans la maison I-DM à une hauteur de 1,10 mètre.

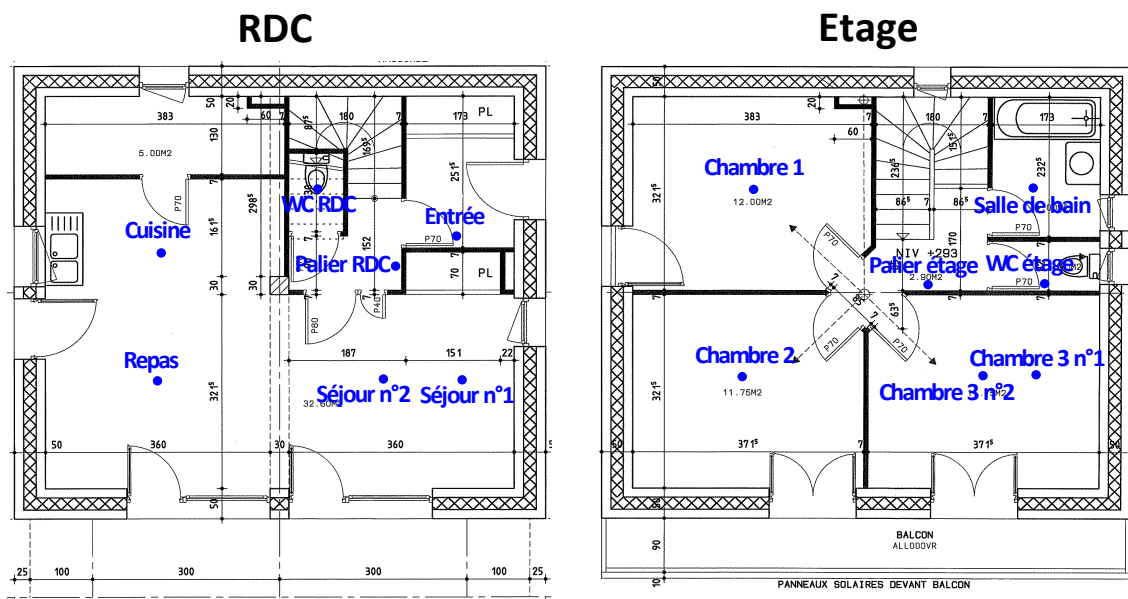
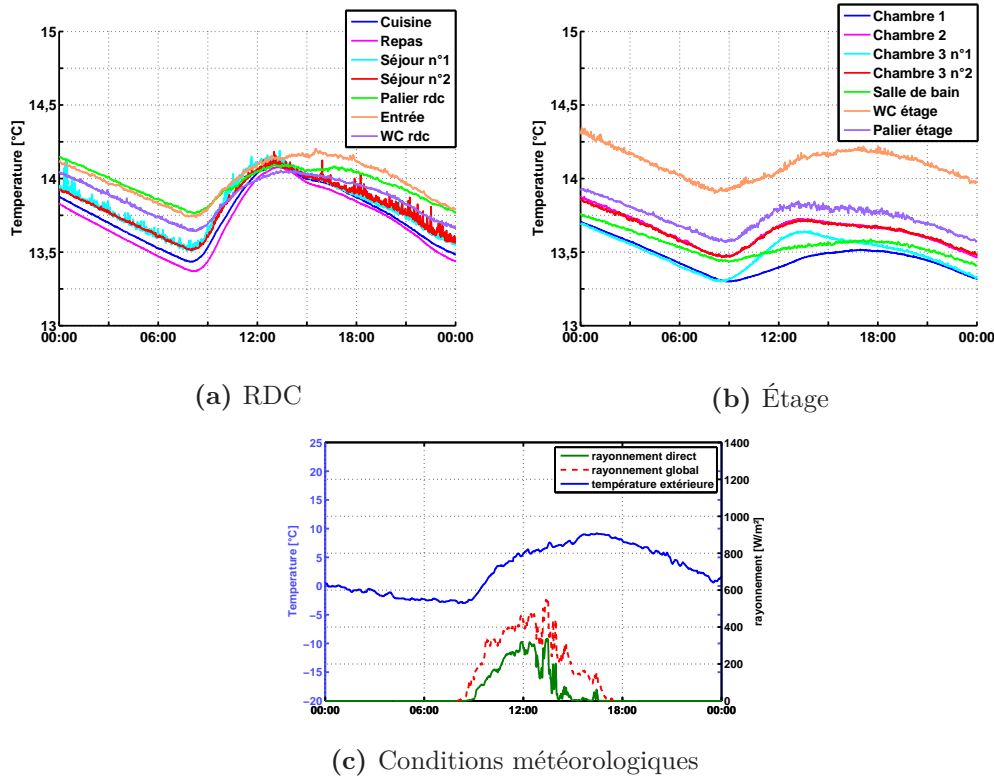
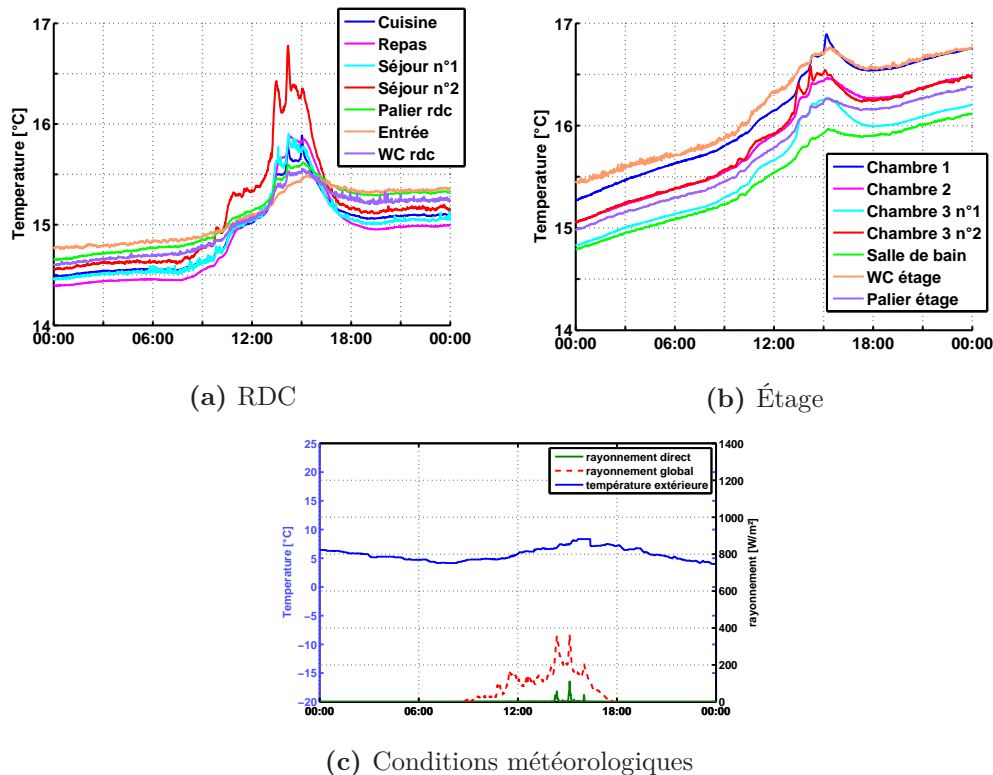


Figure 2.27 – Positionnement des capteurs à une hauteur de 1,10m dans la maison I-DM



**Figure 2.28** – Température d'air sèche dans la maison I-DM pour le 12 février 2011

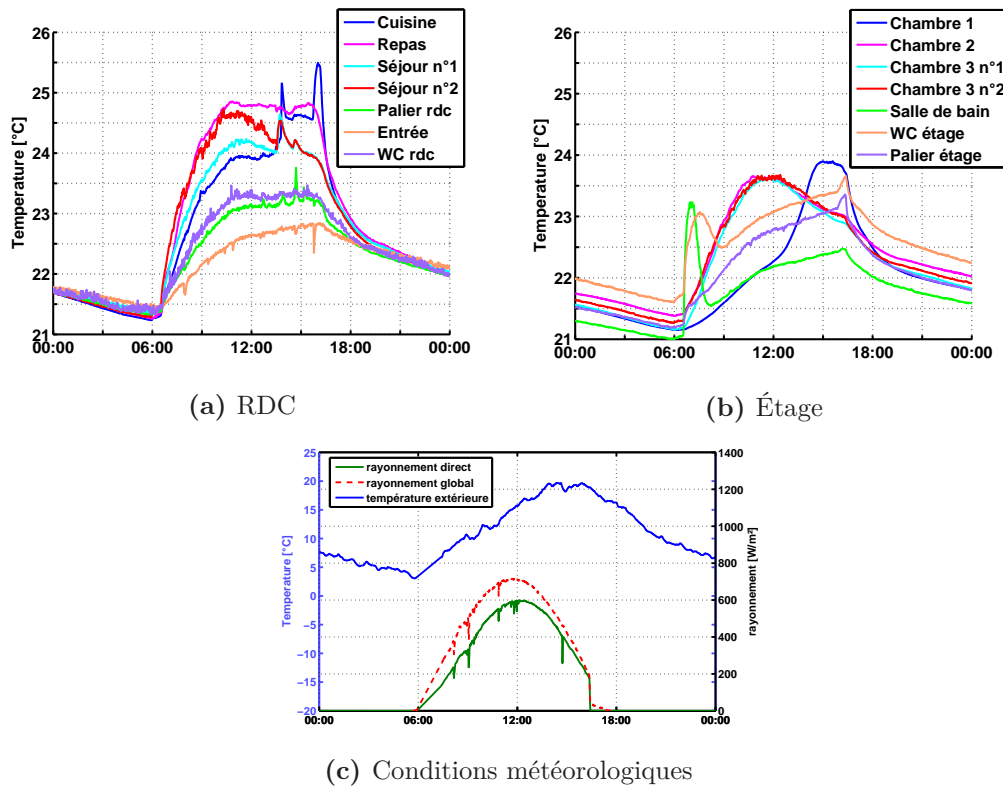
**Écart de température suite à la coupure du chauffage : figure 2.28** Le 12 février, les volets étaient fermés et la résistance électrique ne fonctionnait pas. Les températures mesurées par les capteurs à 1,10 mètre à chaque niveau sont semblables. La température d'air au RDC est comprise dans une plage de 0,5°C et à l'étage dans une plage de 0,75°C. Les pièces ayant les températures d'air les plus élevées par niveau sont des pièces de faibles surfaces avec des appareils électriques dégageant de la chaleur. Dans l'entrée se situe la baie informatique dissipant une chaleur d'environ 130W et dans les WC de l'étage se trouve une centrale d'acquisition dégageant de la chaleur (environ 30W).



**Figure 2.29** – Température d'air sèche dans la maison I-DM pour le 15 février 2011

**Écart de température en période de relance du chauffage : figure 2.29** Le 15 février, c'est la période de remontée en température. Pour le RDC entre le début et la fin de la journée la température d'air moyenne a augmenté de  $0,5^{\circ}\text{C}$  tandis qu'à l'étage de plus de  $1^{\circ}\text{C}$ . Il y a une différence de comportement entre les niveaux induisant des écarts de température. La température d'air au RDC est comprise dans une plage d'incertitude de  $0,4^{\circ}\text{C}$  la nuit et de  $1^{\circ}\text{C}$  le jour et la plage d'incertitude de la température à l'étage est constante avec une valeur de  $0,7^{\circ}\text{C}$ .

Les deux capteurs positionnés dans la zone séjour n'ont pas le même comportement durant les heures d'ensoleillement. Cette différence peut s'expliquer par la différence de bouclier thermique installé autour des sondes. Le capteur séjour n° 2 est plus sensible au rayonnement.



**Figure 2.30** – Température d'air sèche dans la maison I-DM pour le 25 mars 2011

**Observation des pics de températures en journée : figure 2.30** Le 25 mars, c'est une belle journée ensoleillée, on observe des pics de température sur certains capteurs, dans la cuisine, dans les toilettes de l'étage et la salle de bains. Ces pics correspondent au moment où le capteur est touché par le rayonnement solaire direct. Durant la journée, la pièce la plus froide au RDC est l'entrée. Cette pièce n'a pas d'ouverture sur l'extérieur permettant la pénétration du rayonnement solaire. La nuit, on observe une homogénéité entre tous les capteurs au RDC.

L'amplitude de température est plus élevée au RDC qu'à l'étage. Il y a une plus grande part de rayonnement solaire pénétrant au RDC due à la superficie des vitrages au Sud supérieure au RDC par rapport à l'étage. La température d'air au RDC est comprise dans une plage d'incertitude de  $0,2^{\circ}\text{C}$  la nuit et de  $2,5^{\circ}\text{C}$  le jour et la plage d'incertitude de la température à l'étage est de  $0,7^{\circ}\text{C}$  la nuit et de  $1,5^{\circ}\text{C}$  le jour.

**Synthèse des écarts de température** Les figures 2.28, 2.29 et 2.30 représentent les températures d'air au RDC et à l'étage de la maison I-DM pour les journées du 12 février (scénario hors gel), du 15 février (scénario de remonté en température) et du 25 mars 2011 (scénario normal) à une hauteur de 1,10 mètre du sol. Ces figures permettent une meilleure compréhension du comportement de la maison I-DM avec différents scénarios (volets fermés/consigne à 11°C, phase de relance du chauffage et journée de mars bien ensoleillée). Les capteurs de température d'air dans la maison I-DM sont influencés par l'efficacité des boucliers thermiques visant à réduire les effets radiatifs lors des mesures de température d'air.

Le tableau 2.2 récapitule les différences de température journalière avec :

- l'écart maximum observé entre les capteurs par niveau
- l'amplitude de la température journalière par niveau (écart entre le minimum et le maximum de la température au cours de la journée)
- la différence de température entre le RDC et l'étage
- la moyenne de la température extérieure
- le rayonnement solaire direct

Jour	Écart T° entre Capteurs		Amplitude journalière		Écart moyen entre RDC et Étage	T°ext	Rayonnement direct journalier moyen
	RDC	Étage	RDC	Étage			
12 fév.	0.5°C	0.7°C	0.8°C	0.5°C	0.2°C	2.8°C	112W/m <sup>2</sup>
15 fév.	1°C	1°C	1°C	0.5°C	0.8°C	5.7°C	3W/m <sup>2</sup>
25 mars.	2.5°C	1.5°C	3.5°	2.5°C	faible	10.9°C	294W/m <sup>2</sup>

**Table 2.2** – Valeur des écarts de température entre tous les capteurs par niveau, amplitude des températures par niveau, écart moyen entre les niveaux et moyenne de température extérieure et rayonnement direct pour le 12 février, le 15 février et le 25 mars

Le tableau 2.2 permet d'observer la plage de la température mesurée par niveau, la plus élevée étant de 2,5°C pour le 25 mars. Cette plage ne tient pas compte de la stratification de l'air pouvant engendrer des écarts de température entre le plancher et le plafond.

Différentes incertitudes ont été décrites et il est possible de déterminer une plage d'incertitude par niveau. Pour caractériser la température d'air mesurée par niveau, on a considéré un capteur représentatif et non influencé par le rayonnement et une plage d'incertitude de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Pour le cas de la maison I-DM, pour le RDC, on a considéré le capteur de température d'air dans le séjour et pour l'étage le capteur dans la chambre 3. Pour le cas de la maison I-BB, pour le RDC, on a considéré le capteur de température d'air dans le séjour et pour l'étage le capteur dans la chambre 2. La figure 2.31 illustre la plage de température du niveau du RDC de la maison I-DM.

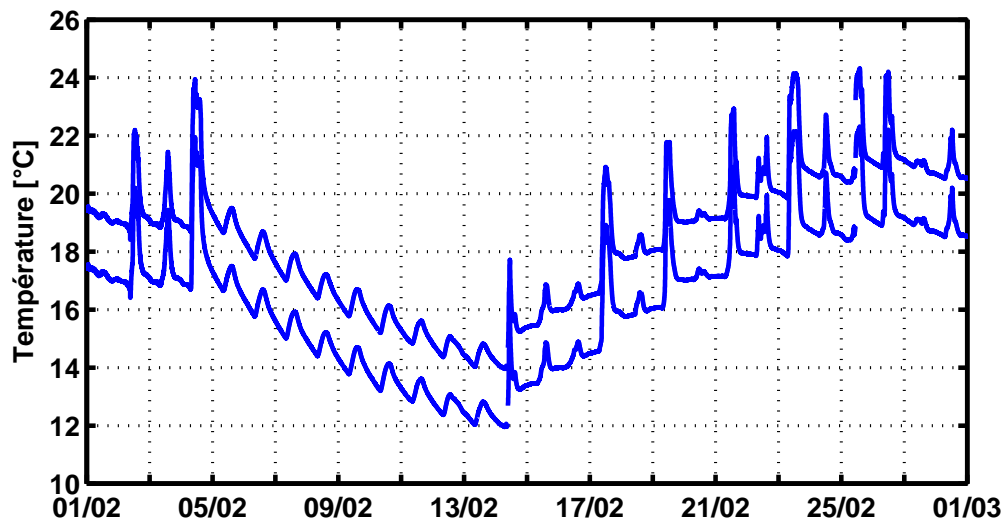


Figure 2.31 – Plage de température pour le niveau du RDC de la maison I-DM

## 2.3 Conclusion

Au cours de ce chapitre, on a présenté l’analyse du comportement des deux maisons INCAS, Double Mur et Béton Banché. Leur géométrie identique, les caractéristiques de l’enveloppe, le très bon traitement des ponts thermiques et de leur étanchéité ainsi que les systèmes énergétiques ont été décrits. Pour permettre le suivi de l’évolution des maisons dans le temps des appareils de mesure ont été installés sur le site dans les maisons mais aussi à l’extérieur afin de connaître les sollicitations climatiques. Nous avons vu que de nombreux appareils de mesure suivent l’évolution du climat : thermomètre, anémomètre, pyranomètre, pyréliomètre, pyrgéomètre, albedomètre... Des dispositifs ont été utilisés afin de mesurer le rayonnement diffus, de façon directe par le biais d’un pyranomètre complété d’un anneau ou bien indirectement par les mesures du rayonnement global et direct et des écarts de l’ordre de 20% ont été observés ce pour une grandeur dont le rôle est prépondérant dès qu’il s’agit de modéliser un bâtiment «solaire». A l’aide des différents points de mesure, on a pu identifier différentes sources d’incertitudes sur les champs de température, sur les sollicitations extérieures et sur la distribution aéraulique.

Les deux bâtiments étudiés ont des modes constructifs différents mais leurs réponses thermiques sont semblables faces aux sollicitations du rayonnement solaire. Par contre, on a observé des écarts de comportement entre les deux bâtiments dus aux résistances électriques qui permettent de réguler la température d’air. Les résistances comportent des différences de fabrication et leurs mesures de puissance sont soumises aux incertitudes de précision du capteur ce qui explique les différences sur les puissances injectées. Les explications des gradients de température sont en partie dues au réseau aéraulique en raison du manque d’étanchéité du système et de la mauvaise répartition du débit.

Ce chapitre a permis d'identifier une plage d'incertitude de mesure pour chaque niveau des maisons. Ces plages d'incertitudes vont permettre de comparer l'expérimentation et la simulation. C'est l'objet du chapitre suivant qui s'intéressera à la présentation de l'outil de simulation choisi et décrira les résultats de la validation du modèle.





## CHAPITRE 3

---

### La validation des modèles numériques des maisons INCAS

---

*Dans ce chapitre, on s'intéressera à la validation des modèles thermiques. Les validations dont EnergyPlus a fait l'objet, outil choisi dans ces travaux, seront présentés. Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à valider les modèles des maisons I-DM et I-BB de la plateforme INCAS. Pour permettre une comparaison entre l'expérimentation et la modélisation tout en tenant compte des incertitudes, les hypothèses de modélisation ont été présentées et un fichier météo du site a été créé.*

Le chapitre 1 a mis en avant la simulation thermique dynamique qui a une importance croissante dans la conception de bâtiments de plus en plus performants tout en mettant en exergue les limites de cette approche quand à sa fiabilité et aux nombreuses incertitudes liées au bâtiment et aux modèles numériques. Avant de détailler la méthodologie proposée pour déterminer les paramètres les plus influents et propager les incertitudes dans le chapitre suivant, il est nécessaire de valider le modèle numérique utilisé des maisons INCAS ce qui est l'objectif de ce chapitre.

## 3.1 Validation des modèles thermiques

La validation d'un code de simulation est une étape importante pour un outil de simulation. Trois étapes sont généralement nécessaires :

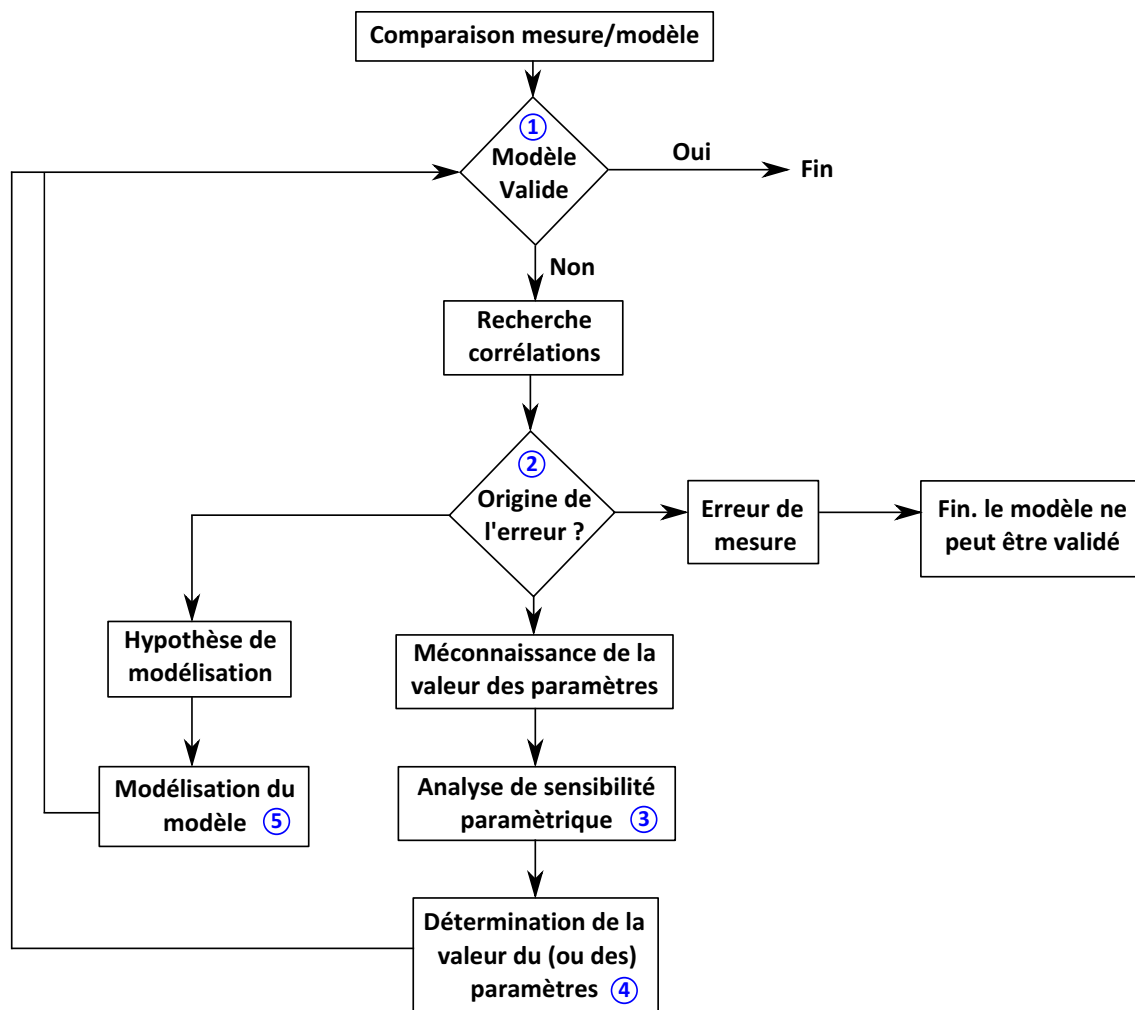
- une vérification analytique
- une comparaison inter-logiciels
- une validation expérimentale

Les deux projets les plus connus s'étant intéressés à la validation des outils de simulation appliquées à la thermique des bâtiments sont PASSYS [32] et BESTEST [48],[49].

Une étape de la validation consiste à définir des variables qui pourront être comparées entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux. La différence entre les mesures et les résultats numériques, nommée résidus, doit être minimisée. T.A. Mara (2000) [39] a travaillé durant sa thèse sur la validation du logiciel CODYRUN permettant la simulation thermoaéraulique du bâtiment. La figure 3.1 présente la méthodologie qu'il a mis en place. Les principales étapes sont :

1. Comparaison entre la mesure et le modèle et si le résidu est compris dans l'intervalle d'incertitude de la mesure, le modèle est jugé valide.
2. Si le modèle n'est pas valide, les entrées corrélées au résidu sont recherchées en utilisant l'analyse temps-fréquence : si une erreur de mesure est identifiée la validation n'est pas possible.
3. Si la mauvaise prise en compte de l'entrée identifiée à l'étape précédente est due à la méconnaissance de la valeur d'un (ou plusieurs) paramètre(s), l'analyse de sensibilité paramétrique du modèle est effectuée.
4. Une fois les paramètres les plus influents déterminés, l'effet du paramètre le plus influent sur la sortie étudiée est corrélé au résidu.
5. La valeur de ce(s) dernier(s) est modifiée jusqu'à ce que le nouveau résidu obtenu ne soit plus corrélé à l'effet du (ou des) paramètre(s) identifié(s) à l'étape précédente.

Le recours aux analyses de sensibilité et à l'expérimentation permet la validation du modèle thermique. E. Palomo (2003) [20] [19] dans la tâche 22 de l'IEA, définit la validation de modèle avec deux étapes : la vérification du modèle et le diagnostic. La vérification du modèle implique de tester la performance du modèle en identifiant les différences significatives entre la mesure et la simulation. L'étape de diagnostic



**Figure 3.1** – Méthodologie de la validation expérimentale (extrait de Mara, 2000 [39])

permet d'expliquer les écarts observés entre la simulation et la mesure.

Dans la suite, l'outil de simulation EnergyPlus a été choisi et des variables ont été définies pour effectuer la validation expérimentale des modèles thermiques des maisons I-DM et I-BB.

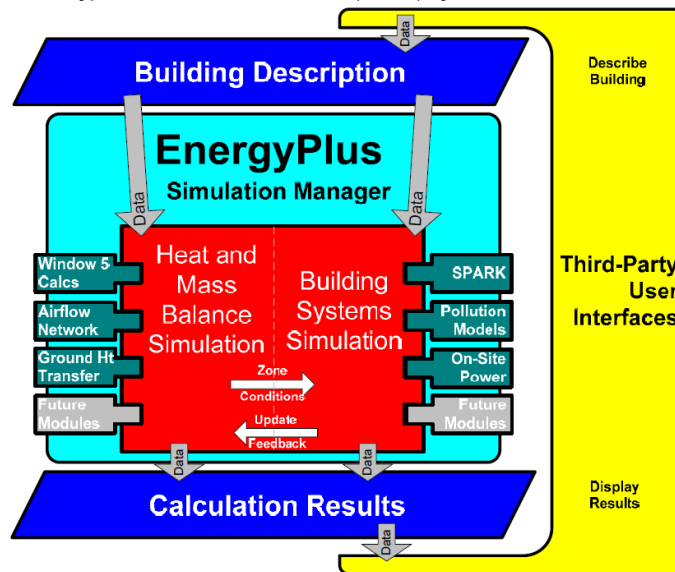
## 3.2 Description de l'outil numérique : EnergyPlus

### 3.2.1 Description d'EnergyPlus

L'outil de simulation choisi pour l'étude de fiabilité est EnergyPlus version 6 (Crawley et al., 2001 [16]). Il s'agit d'un outil de simulation dynamique permettant de prévoir le comportement énergétique de bâtiments. EnergyPlus se base sur les outils BLAST<sup>1</sup> et DOE-2, qui ont été développés dans les années 80 et reste en développe-

---

1. BLAST : Building Loads Analyse and System Thermodynamics



**Figure 3.2** – EnergyPlus (extrait du manuel d'utilisateur d'EnergyPlus [4])

ment avec une nouvelle version disponible tous les 6 mois. Il peut être utilisé par des ingénieurs, des architectes et des chercheurs et c'est le département de l'énergie des États Unis (DOE) qui finance cet outil, le LBNL<sup>2</sup> coordonnant le développement. Il est disponible librement sur le site du département de l'énergie.

EnergyPlus permet de modéliser le chauffage, le refroidissement, l'éclairage, la ventilation et de nombreux autres flux d'énergie. Il permet d'effectuer les simulations à un pas de temps inférieur à l'heure, de modéliser des systèmes énergétiques complexes, d'analyser le confort thermique, de traiter du multizone, de gérer la ventilation naturelle et il peut être couplé à d'autres outils comme WINDOW5 ou Dymola.

EnergyPlus est uniquement un moteur de calcul sans interface graphique conviviale. Des outils se sont développés utilisant le moteur de calcul d'EnergyPlus mais avec leur propre interface graphique comme par exemple l'outil DesignBuilder. DesignBuilder permet la saisie graphique d'un modèle, la gestion de ses bases de données (matériaux, vitres, plannings d'activité, etc.) et gère de façon transparente la liaison au moteur de calcul jusqu'à la restitution des résultats sous forme graphique ou tableur.

Le langage de programmation des outils DOE-2 et BLAST était le FORTRAN. Les développeurs d'EnergyPlus ont souhaité réaliser un outil modulaire et qui puisse être en continuel développement. Ils ont choisi le langage de programmation FORTRAN 90. La figure 3.2 décrit l'ensemble de l'environnement ainsi que les programmes couplés à EnergyPlus.

2. LBNL : Lawrence Berkeley National Laboratory

De nombreux équipements CVC<sup>3</sup> sont développés comme différents panneaux solaires, plusieurs type de ventilateurs, de pompes, d'échangeurs.... mais la principale difficulté est d'assembler ces composants pour réaliser le système énergétique voulu. Les interfaces graphiques permettant l'assemblage des composants sont en cours de développement et vont permettre de faciliter la mise en oeuvre des systèmes CVC. Le manque d'interface graphique est actuellement un des inconvénients d'EnergyPlus. Le NREL<sup>4</sup> développe un plugin, Open Studio, permettant la saisie graphique du bâtiment et de ses différentes zones thermiques ainsi que la saisie graphique des systèmes énergétiques. Même si le développement de nouveau modèle dans EnergyPlus est possible, l'utilisation de langage de programmation plus récent est de plus en plus favorisée comme par exemple, l'utilisation du langage Modelica qui permet de développer ses propres modèles et de les partager facilement (voir 1.3.4).

### 3.2.2 Validations réalisées sur l'outil

L'outil EnergyPlus a fait l'objet de nombreuses validations. Le site Internet du Département de l'Énergie des États-Unis présente les validations de l'outil EnergyPlus<sup>5</sup>.

Des comparaisons entre différents outils de simulation appliqués à la modélisation de bâtiment dont EnergyPlus ont été faites. L'utilisation de la méthode du BES-TEST est la plus souvent employée [30]. La tâche 34 de l'IEA [33] s'est intéressée à développer une méthode d'analyse pour tester les outils de simulation du bâtiment et EnergyPlus en faisait partie. L'objectif de cette tâche consistait à garantir le fait que les outils de simulation aient été testés et validés expérimentalement pour le cas de bâtiments à faible consommation énergétique. Le département de l'énergie des États-Unis s'est intéressé à tester l'outil EnergyPlus et à rédiger plusieurs rapports [27], [28], [29]. Au sein d'INES, une étude s'est intéressée à la comparaison de plusieurs outils de simulation appliquée à la maison I-DM [9]. Les résultats de l'outil EnergyPlus étaient cohérents avec les autres outils comme illustré figure 1.4.

EnergyPlus est un outil de simulation ayant fait l'objet de nombreuses validations et s'applique tout à fait aux bâtiments à basse consommation. Une des données d'entrée nécessaire à une simulation thermique dynamique est un fichier météo complet.

### 3.2.3 Présentation du fichier météo d'EnergyPlus

Nous avons pu mettre en évidence dans le premier chapitre l'importance des conditions météorologiques sur les différences entre les calculs réalisés en amont de la conception, les consommations réelles et l'incertitude générée par celles-ci. Dans le cadre d'une comparaison avec des mesures expérimentales, la création du fichier météorologique est une étape clé du processus pour maîtriser au mieux les incertitudes

---

3. CVC : Chauffage Ventilation Climatisation

4. NREL : National Renewable Energy Laboratory

5. [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus\\_testing.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_testing.cfm)

qui lui sont liées.

Pour effectuer une simulation en régime dynamique, il est nécessaire d'avoir un fichier météo du lieu concerné avec un pas de temps horaire au minimum. Le pas de temps du fichier utilisé aura un impact sur les résultats de la simulation et doit être cohérent avec le pas de temps de la simulation. La période du fichier peut varier mais si l'étude porte sur la période annuelle, le fichier météo doit contenir un an de données. Les principales données nécessaires pour la simulation sont [14] :

- température sèche extérieur ( $^{\circ}\text{C}$ )
- température du point de rosée ( $^{\circ}\text{C}$ )
- vitesse du vent ( $\text{m/s}$ )
- direction du vent ( $^{\circ}$  par rapport au nord)
- pression atmosphérique (bar)
- rayonnement net ( $\text{W/m}^2$ )
- rayonnement global horizontal (ou rayonnement diffus horizontal) ( $\text{W/m}^2$ )
- rayonnement direct normal ( $\text{W/m}^2$ )
- si les données de rayonnement solaire ne sont pas disponibles :
  - couverture nuageuse et type ( $\%$ , -)
  - nombre d'heure d'ensoleillement (hr)

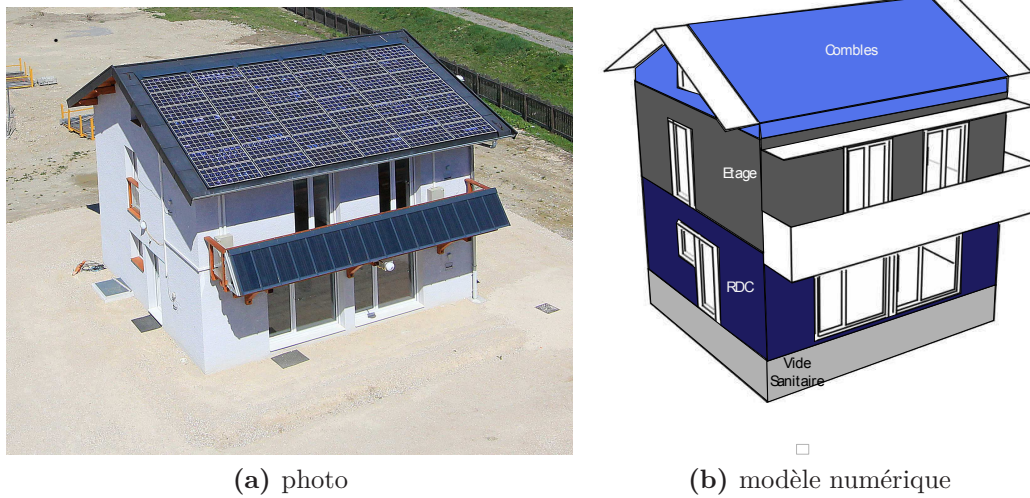
L'outil le plus connu en Europe pour générer des données météorologiques est Meteonorm. Il contient des bases de données de plus de 7700 stations météo. Il contient également des algorithmes permettant de créer, à partir des valeurs mesurées, des fichiers météo de n'importe quel endroit sur le globe.

Les fichiers météo d'EnergyPlus sont au format «.epw». C'est un format propre à EnergyPlus [15]. En annexe G sont représentées les douze premières lignes du fichier météo d'EnergyPlus pour la ville de Chambéry/Aix les Bains. L'annexe H référence les caractéristiques des 32 colonnes contenues dans le fichier météo d'EnergyPlus. De nombreuses données sont rarement mesurées mais des valeurs par défaut sont considérées.

Dans la partie 2.1.3.1, nous avons décrit l'instrumentation mise en place pour mesurer les conditions climatiques du site d'INES. La création d'un fichier météo est un point clé de la comparaison entre l'expérimentation et la simulation. Une attention particulière a été portée à celui-ci. Un fichier météo avec un pas de temps de la minute a été créé de la période du 28 janvier au 31 mars 2011. Pour les mesures de rayonnement, on considère les mesures les plus précises en terme d'appareil de mesure tout en sachant qu'il y a une incertitude de mesure.

### 3.3 Hypothèses de modélisation

Il est impossible de reproduire numériquement à l'identique un bâtiment réel et le choix des hypothèses de modélisation a de l'importance. Les principales hypothèses qui ont été faites pour les maisons INCAS sont classées en trois catégories :



**Figure 3.3** – Maison expérimentale de la plateforme INCAS vue Sud et Ouest

- enveloppe thermique
- système énergétique
- modèle numérique

Pour l’enveloppe thermique, les hypothèses sont :

**Division en zones thermiques** Le modèle retenu a été considéré avec 4 zones thermiques, 2 zones thermiques chauffées, le RDC et le premier étage et deux zones thermiques tampons qui sont le vide sanitaire et les combles. La figure 3.3 représente les zones thermiques considérées. Deux autres hypothèses auraient été possibles :

- de modéliser chaque pièce par une zone thermique
- de modéliser le RDC et l’étage comme une seule zone

Durant la période étudiée les portes à l’intérieur des maisons étaient ouvertes créant des mouvements d’air entre les pièces difficilement mesurables. Le fait de ne considérer qu’une seule zone par niveau permet de s’affranchir des incertitudes des débits d’air transférés entre zones/pièces.

On a observé dans le chapitre 2, une différence notable de température entre le RDC et l’étage. La modélisation du RDC et l’étage comme une seule zone ne considère pas l’écart de température mais permet de s’affranchir de l’incertitude des mouvements d’air entre les deux niveaux.

Dans notre cas, nous avons préféré modéliser une zone par niveau et considérer un transfert d’air entre le RDC et l’étage. Cette hypothèse a l’avantage de réduire le temps de simulation par rapport à l’hypothèse considérant une zone égale à une pièce.

**Dimension de la maison** Les outils de simulation dynamique comme Energy-Plus, Trnsys et Comfie/Pléiade ne prennent pas en compte l’épaisseur des parois. Le choix de la dimension du modèle numérique implique des erreurs. Si c’est la



dimension des murs extérieurs qui est choisie, le volume chauffé sera nettement supérieur à la réalité surtout dans le cas des maisons INCAS ayant une épaisseur de mur supérieure à 40 cm. Si c'est la dimension des murs intérieurs qui est choisie, la surface de déperdition sera inférieure à la réalité. Le choix s'est alors porté sur le milieu des murs. L'augmentation du volume chauffé et la diminution de la surface de déperdition ne sont pas considérées comme des paramètres importants et sont négligées dans la suite de l'étude. Une autre hypothèse à considérer concerne la surface de référence à considérer. La performance énergétique d'un bâtiment est généralement rapportée à la surface comme par exemple le besoin de chauffage dont l'unité utilisée est  $[W/(m^2.an)]$ . Pour le label PassivHaus c'est la surface extérieure qui est considérée, elle est égale à  $127,5m^2$  dans le cas de la maison I-DM or dans la réglementation thermique 2005 c'est la SHON<sup>6</sup> qui est utilisée égale à  $97,5m^2$  pour la I-DM, il y a plus de 20% d'écart entre les deux surfaces. La différence de résultat sur le besoin de chauffage entre le choix de la surface de référence est source donc d'incertitude sur le résultat : dans notre cas, on considérera la SHON qui est égale à  $97,5m^2$ .

**Masques** Le balcon, l'avancement de la toiture ainsi que le retrait des fenêtres visibles sur la figure 3.3 ont été considérés. La taille du balcon a été considérée sans l'épaisseur de la dalle du plancher intermédiaire non prise en compte dans la modélisation. Un balcon opaque a été considéré pour les deux maisons, I-DM et I-BB. Malgré le fait que pour la I-BB, les panneaux solaires thermiques sont composés de tubes sous vide laissant pénétrer une partie du rayonnement, mais on a pris l'hypothèse que ce rayonnement était minime et on ne l'a pas considéré. Le garde corps pour accéder aux combles n'a pas été modélisé. Il n'y a aucun masque proche (arbres, bâtiment) et les masques lointains dus aux montagnes n'ont pas été considérés car ils sont déjà pris en compte dans les mesures météo. Cette hypothèse est soumise aux incertitudes de dimension du balcon et de l'avancement de la toiture mais son impact sur le comportement thermique de la maison est négligeable.

**Débit d'infiltration** Deux tests d'étanchéité ont été réalisés avec une porte soufflante par le CETE de Lyon pour chacune des maisons. La première campagne a eu lieu en cours de chantier après la mise hors d'eau et hors d'air des maisons et la deuxième campagne a eu lieu à la réception des maisons. Le tableau 3.1 résume les résultats obtenus ainsi que les exigences des labels PassivHaus et BBC. Pour la modélisation le débit d'infiltration considéré est de  $0.115Vol/h$  pour la maison I-DM et de  $0.05Vol/h$  pour la maison I-BB. Les pertes par infiltration sont modélisées par un débit constant or les pressions exercées par l'effet du vent sur les surfaces extérieures du bâtiment ont un impact sur le débit d'infiltration et de nombreuses incertitudes subsistent sur la valeur à considérer dans les codes. De plus, le test d'étanchéité peut être effectué sur plusieurs ouvertures mais le résultat ne sera pas identique entre les différentes configurations. Dans la suite des travaux, on verra que l'incertitude de ce paramètre a un impact sur les performances énergétiques du bâtiment.

---

6. SHON : surface hors oeuvre net

### 3.3 Hypothèses de modélisation

Normes	Maison	Résultats des mesures
Passiv'Haus : $n_{50} < 0,60 \text{ vol/h}$	Maison I-DM	0,62 Vol/h
	Maison I-BB	0,26 Vol/h
BBC : $Q_{4Pa-Surf} < 0,60 \text{ m}^3 / (\text{h.m}^2 \text{ de parois déperditives})$	Maison I-DM	0.115 Vol/h
	Maison I-BB	0,05 Vol/h

**Table 3.1** – Valeur du test d'étanchéité

**Les faux plafonds** Les faux plafonds n'ont pas été modélisés comme une zone thermique. Leurs volumes sont considérés dans les zones du RDC ou de l'étage comme étant de l'air. L'incertitude de cette hypothèse sur les résultats de simulation est faible car certaines dalles du faux plafond étaient soulevées pour des raisons techniques et de maintenance et le faux plafond n'est pas étanche faisant facilement circuler l'air entre le faux plafond et le RDC ou l'étage.

**Apports internes** Les maisons ne sont pas occupées. Les apports internes sont dus aux équipements des maisons et des centrales d'acquisitions. Au RDC, comme appareil il y a un onduleur, une baie informatique, trois transformateurs et deux centrales d'acquisition. A l'étage, il y a deux centrales d'acquisition et deux transformateurs. Pour la zone du RDC, nous avons considéré 180W et pour la zone de l'étage 40W de charge interne constant tout au long de la journée. Nous avons considéré que l'énergie consommée est égale à l'énergie dissipée des appareils ce qui correspond à  $2,2 \text{ W/m}^2$ . Le label PassivHaus considère un apport de chaleur interne égal à  $2,1 \text{ W/m}^2$  et la RT2005  $4,5 \text{ W/m}^2$ . Ces ratios comportent une forte incertitude que l'on considérera par la suite.

**Pont thermique** Une attention particulière a été portée à la réduction de potentiels ponts thermiques lors de la conception et de la construction. Dans EnergyPlus, la modélisation des ponts thermiques n'est pas directement prévue. Le calcul d'une surface équivalente thermique doit être effectué afin d'intégrer le pont thermique. Dans notre cas, aucun pont thermique n'a été pris en compte. Cette hypothèse peut engendrer une enveloppe thermique plus performante que la réalité.

**Albedo** Le sol jouxtant les maisons est du sable blanc et à proximité on a de l'herbe, or la valeur de l'albédo est différente entre ces deux revêtements. Concernant la valeur à considérer dans les codes de simulation le sable blanc à proximité des maisons est prédominant avec un albedo de 0,35. Cette valeur a été mesurée au cours de l'été 2011, mais une incertitude d'environ 10% est à prendre en compte en raison de l'incertitude sur la mesure.

**Système énergétique** Le système énergétique de la maison a été modélisé finement à l'aide d'EnergyPlus. Il est composé d'un échangeur, d'une résistance électrique de 1150W et de 2 ventilateurs : l'un pour l'extraction et l'autre pour l'insufflation. La répartition des débits injectés entre le RDC et l'étage peut être modulée et

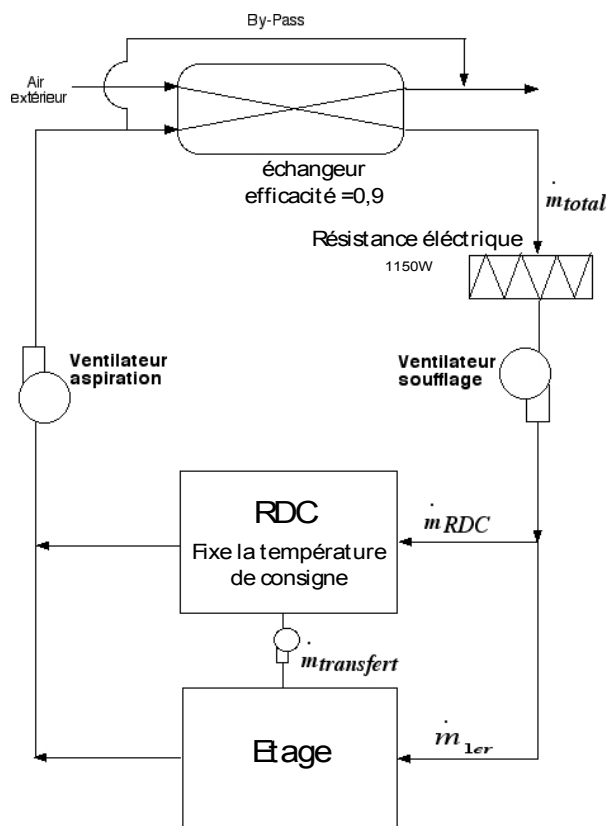


Figure 3.4 – Le système énergétique modélisé

nous avons forcé un transfert d'air entre le RDC et l'étage. La figure 3.4 représente le système modélisé. Les débits dans la maison doivent être équilibrés, c'est à dire conservation des débits massiques en entrée et en sortie. Il n'y a pas de système de refroidissement. En annexe I, la description du modèle est faite avec la description des noeuds et des systèmes utilisés pour la modélisation. La consigne de chauffage est régulée par la zone du RDC.

**Efficacité de la ventilation double flux** Le rendement de la ventilation double flux est indiqué par le constructeur égal à 0,92. Cette valeur considère un rendement maximum pour des conditions particulières. Dans la modélisation, nous n'avons pas considéré le rendement mais une efficacité de 0,9 comme définie dans la partie 2.2.4 à l'aide de la mesure. L'incertitude liée à cette valeur sera par la suite prise en compte.

**Puissance de la résistance** Le constructeur indique que la puissance de la résistance électrique installée dans les maisons est de 1200W. On mesure pour la I-DM une puissance d'environ 1130W tandis que pour la I-BB 1190W. On considère l'hypothèse que les résistances installées sont identiques mais que la mesure effectuée dans les maisons comporte des incertitudes. Pour la modélisation des deux maisons, on considère la même puissance de résistance de 1150W avec un rendement égal à 1. Cette valeur comporte une incertitude que l'on considérera par la suite.

**Débit de ventilation** Le débit de ventilation réglementaire imposé pour les maisons INCAS est égal à  $135\text{m}^3/\text{h}$ . D'après les mesures effectuées dans la maison I-DM à l'aide des débitmètres durant les mois de février et de mars, on a considéré un débit égal à  $135\text{m}^3/\text{h}$  en période normale et de  $80\text{m}^3/\text{h}$  en période hors gel. En période normale, nous avons considéré un débit soufflé au RDC égal à  $73\text{m}^3/\text{h}$  et à l'étage de  $62\text{m}^3/\text{h}$  et un débit de  $15\text{m}^3/\text{h}$  a été considéré entre les deux niveaux allant du RDC vers l'étage. Dans la modélisation, il est nécessaire d'avoir un débit soufflé égal au débit aspiré ce qui explique que l'air aspiré à l'étage est plus important qu'au RDC. Les mêmes rapports de répartition du débit ont été considérés en période hors gel et les mêmes débits ont été considérés pour les deux maisons.

**Modèle numérique** L'algorithme utilisé est celui des fonctions de transfert [3] qui utilise deux équations qui définissent le flux intérieur et extérieur en fonction de la température de surface intérieure et extérieure au pas de temps présent et au pas de temps précédent. Les fonctions de transfert sont particulièrement adaptées et fiables pour les transferts thermiques.

**Coefficients de convection** Dans EnergyPlus, il y a plusieurs choix pour la modélisation des coefficients de convection. Nous avons considéré l'algorithme TARP proposé par l'ASHRAE pour l'extérieur et l'intérieur [3] qui a été créé par Walton (1983). EnergyPlus propose quatre corrélations pour les surfaces intérieures et six pour les extérieures ce qui reflète les incertitudes sur ce paramètre.

**La tache solaire** est représentée par un modèle qui considère la quantité de rayonnement direct éclairant chaque surface (plancher, mur, vitrage) en projetant les rayons du soleil à travers les vitrages extérieurs tout en tenant compte des protections solaires fixes et mobiles. Cette hypothèse induit une répartition du flux solaire dans toute la zone.

## 3.4 Confrontation entre modèle et expérimentation

### 3.4.1 Initialisation de la simulation

Dans le cadre d'une confrontation entre des résultats de simulation et de l'expérimentation, la phase d'initialisation d'un outil de simulation dynamique est très importante. Les premiers jours de simulation sont directement influencés par cette étape. Pour limiter les erreurs, il est important de choisir correctement la période de simulation et de maîtriser l'initialisation.

Pour effectuer l'initialisation, EnergyPlus considère au début de la simulation, une température de zone et de parois de  $23^\circ\text{C}$ , il répète ensuite le premier jour simulé jusqu'à ce que les grandeurs de celui-ci se stabilisent. Deux paramètres permettent de contrôler cette initialisation : la valeur de la convergence ainsi qu'un nombre maximum de répétition du premier jour de simulation. EnergyPlus permet l'étude

des résultats de la période d'initialisation si l'utilisateur le demande. Pour s'affranchir d'une partie des erreurs dues à l'initialisation si la simulation est annuelle, il est aussi possible avec EnergyPlus de répéter la période de simulation et de ne post-traiter que la seconde période simulée.

Dans la suite de ces travaux, nous avons étudié l'influence de la période d'initialisation sur l'évolution de la température d'air. Nous avons modélisé la maison I-DM sur la période du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre pendant deux années consécutives. On a appelé 1<sup>ère</sup> année et 2<sup>ème</sup> année les résultats respectifs de la première période de simulation et de la répétition. Du 15 mai au 14 octobre, les volets se ferment lorsque le rayonnement horizontal dépasse 300W/m<sup>2</sup>. Du 15 septembre au 14 mai, le débit de ventilation est de 0.125V/h, c'est un débit de renouvellement d'air équivalent du point de vue énergétique à une ventilation double flux<sup>7</sup> et du 15 mai au 14 septembre le débit de ventilation est de 0,6V/h. La valeur de la convergence est de 0,001 et le nombre maximum de jour de répétition est de 100. Les simulations sont effectuées avec le fichier météo annuel de Chambéry fourni par défaut. Nous avons considéré les configurations suivantes :

1. Première configuration : la température de consigne du chauffage est de 19°C.
2. Seconde configuration : aucun système de chauffage n'a été modélisé.

La figure 3.5 représente les résultats pour la première configuration avec une température de consigne de 19°C. La figure 3.5a représente la température d'air de la 1<sup>ère</sup> et de la 2<sup>ème</sup> année et on observe la phase d'initialisation (courbe rouge et trait continu) pour la journée du 1<sup>er</sup> janvier. Il n'y a aucun écart entre les résultats de la 1<sup>ère</sup> et de la 2<sup>ème</sup> année et le premier jour de simulation, le 1<sup>er</sup> janvier, a été répété 25 fois (figure 3.5b).

La figure 3.6 représente les résultats pour la deuxième configuration correspondant à une évolution libre. Les résultats entre la 1<sup>ère</sup> et de la 2<sup>ème</sup> année sont égaux au bout de 25 jours et il y a 2°C au 1<sup>er</sup> janvier. Dans ce cas, le premier jour de simulation, le 1<sup>er</sup> janvier, est répété 81 fois (figure 3.6b).

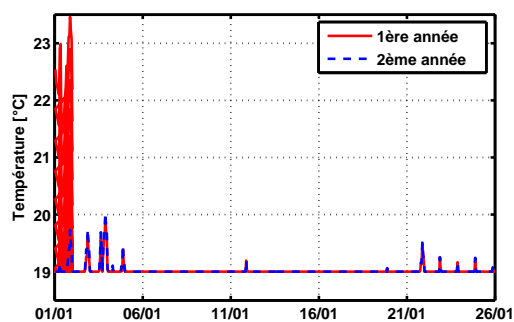
Ces deux simulations, nous montrent qu'il ne faut pas négliger la phase d'initialisation. Dans le cas d'une température d'air fixée par une consigne l'initialisation d'EnergyPlus, et donc la période de répétition du premier jour de simulation semble suffisante pour déterminer la température d'air. Si les températures d'air dans les zones thermiques sont en évolution libre, la phase d'initialisation d'EnergyPlus malgré 81 répétitions du 1<sup>er</sup> jour de simulation ne sera pas suffisante pour que les températures d'air ne soient pas influencées par l'état initial.

Dans le cas de comparaison entre des résultats d'expérimentation et des résultats numériques, il est important de bien déterminer la phase d'initialisation de l'outil pour ne pas avoir des résultats influencés par cette phase. Pour chaque cas la période

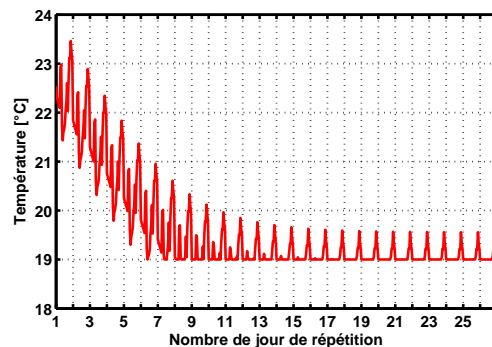
---

7. cette équivalence n'est valable que lorsque les températures extérieures sont inférieures aux températures intérieures

### 3.4 Confrontation entre modèle et expérimentation

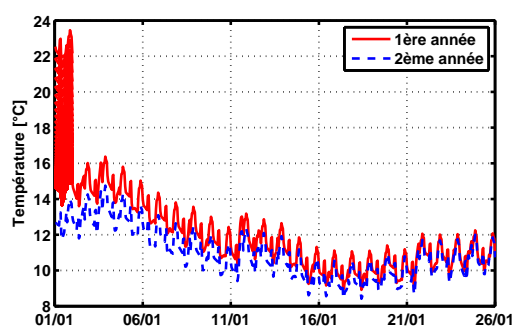


(a) Température d'air du 1<sup>er</sup> au 26 janvier pour la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année

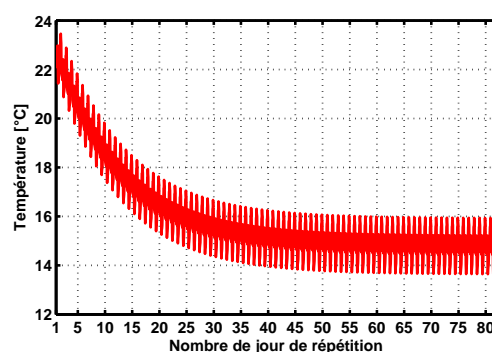


(b) Phase d'initialisation : répétition du 1<sup>er</sup> jour de simulation : le 1<sup>er</sup> janvier

**Figure 3.5** – Température d'air pour la première configuration et phase d'initialisation avec une consigne du chauffage de 19°C

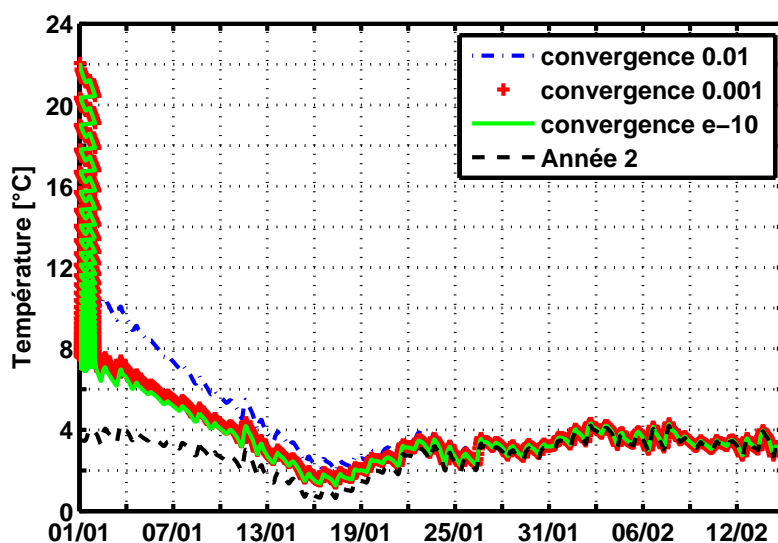


(a) Température d'air du 1<sup>er</sup> au 26 janvier pour la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année



(b) Phase d'initialisation : répétition du 1<sup>er</sup> jour de simulation : le 1<sup>er</sup> janvier

**Figure 3.6** – Résultat de la température d'air pour la deuxième configuration et phase d'initialisation : en évolution libre



**Figure 3.7** – Comparaison de résultats de température d’air du RDC avec différentes valeurs de convergences

d’initialisation est différente, elle dépend de nombreux facteurs comme le type de bâtiment, l’évolution libre ou non des températures d’air dans les zones thermiques, les scénarios, la constante de temps du bâtiment....

**Valeur du coefficient de convergence** La valeur du nombre de répétitions du premier jour de simulation est influencée par la valeur de la convergence. Plus la convergence est faible, plus le nombre de jours de répétition sera élevé. Pour observer l’effet de ce paramètre sur les résultats plusieurs simulations ont été réalisées en modifiant sa valeur.

Pour illustrer ceci, la maison I-DM a été simulée en évolution libre avec les volets fermés tout au long de l’année. La simulation débute le 1<sup>er</sup> janvier et a été répétée une fois avec un nombre maximal de jours de répétition de 100.

On observe sur la figure 3.7 les résultats de la température d’air du RDC pour les trois valeurs de convergence différentes ainsi que les résultats de la température d’air pour l’année 2, c’est-à-dire la répétition de la période de simulation. La figure 3.7 montre l’influence de la convergence sur le nombre de jour de répétition du 1<sup>er</sup> janvier. Pour une valeur de convergence de 0,01, le premier jour est répété 12 fois tandis que pour une valeur de convergence de 0,001 il est répété plus de 50 fois. Sur la figure 3.7, on remarque qu’il est inutile de mettre une valeur de convergence très faible comme  $10^{-10}$  car les écarts de résultats avec une valeur de convergence de 0,001 sont très faibles or plus la convergence est faible, plus le temps de simulation sera long.

La valeur de la convergence a une influence sur le nombre de jours nécessaire à l’ini-



tialisation. Dans le cas présent, la convergence a un impact sur le temps écoulé pour que les résultats de l'année 1 recollent avec les résultats de l'année 2. Une convergence à 0,001 semble un bon compromis entre précision et temps de calcul. En effet la figure 3.7 montre que les températures sont similaires avec une convergence à  $10^{-10}$ . Une valeur de convergence trop faible augmentera le temps de calcul d'environ 10% sans pour autant améliorer significativement la précision.

Si la simulation commence un jour d'hiver où la température d'air est régulée à l'aide d'un système énergétique aucune attention particulière ne devra être portée à la période d'initialisation par contre si celle-ci commence un jour d'été la température d'air est en évolution libre et les résultats du premier mois de simulation ne devront pas être considérés pour s'affranchir de l'état initial. Une convergence égale à 0,001 suffit pour obtenir des résultats fiables.

#### 3.4.2 Premiers résultats de simulation

La simulation commence le 28 janvier et finit le 31 mars avec une température de consigne dans les maisons fixée à 20°C. On estime que le temps d'initialisation effectué par EnergyPlus est suffisant et que dans cette configuration les premiers jours de simulation ne sont pas influencés par l'état initial d'EnergyPlus.

La figure 3.8 présente les résultats de la simulation pour la température d'air du RDC et de l'étage ainsi que la puissance de la résistance électrique du 1<sup>er</sup> février au 30 mars 2011 pour la maison I-DM. Les différents scénarios présentés sur la figure 2.13 ont été appliqués. La puissance maximale de chauffage est de 1150W comme indiqué dans les hypothèses et lorsque la consigne est atteinte la puissance est plus faible voir nulle.

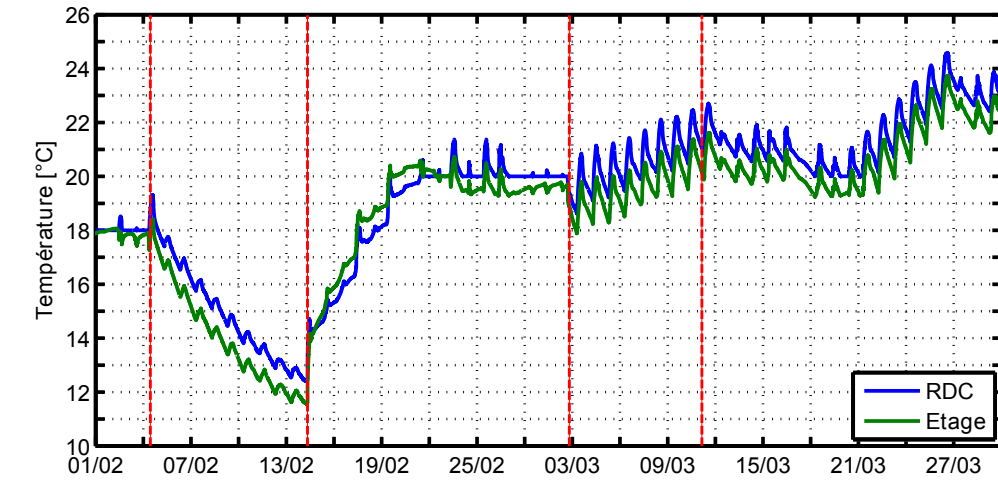
On observe que la température d'air du RDC est supérieure à celle de l'étage d'environ 1°C lors des période de baisse de la consigne et lorsque la température est en évolution libre. Cela peut s'expliquer par la différence de débit car le débit soufflé au RDC est supérieur au débit soufflé à l'étage. Une explication plus détaillée de ces résultats sera effectuée par la suite lors de l'étape de validation du modèle thermique.

Une comparaison entre la mesure et les résultats de simulation a été effectuée. Plusieurs variables ont été choisies : le rayonnement incident pour vérifier le fichier météo et les températures d'air des zones non chauffées et des zones chauffées.

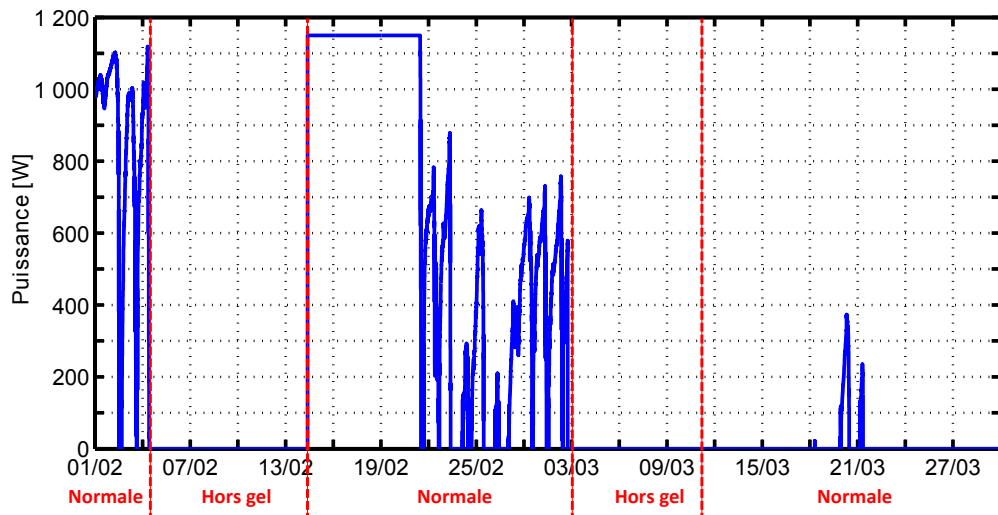
#### 3.4.3 Validation du fichier météo : rayonnement incident

Sur chaque façade de la maison I-DM sont installés des pyranomètres mesurant le rayonnement global par façade de telle sorte à ne pas être influencés par les masques proches (avancement de toit et balcon). La simulation calcule le rayonnement incident par façade pour chaque zone en fonction du rayonnement global du fichier météo. Il est possible de comparer le rayonnement mesuré par les pyranomètres et le rayonnement incident sur les façades de chaque zone calculé par EnergyPlus. Cette



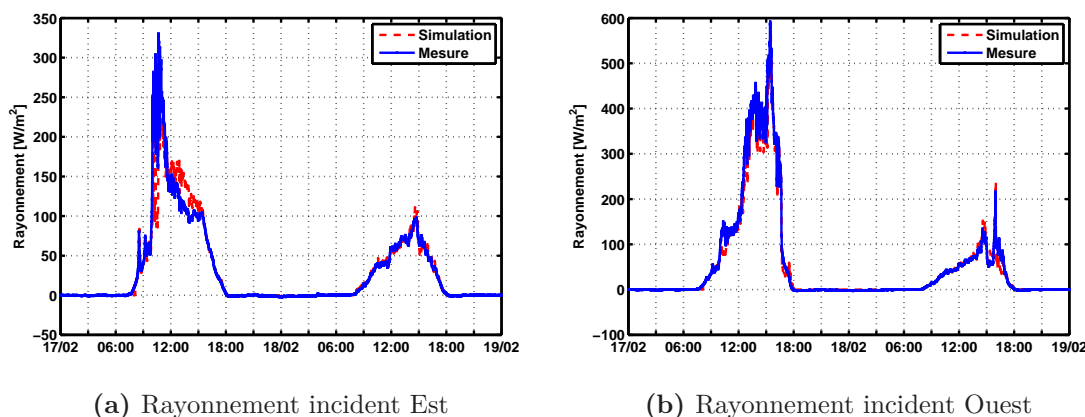


(a) Température d'air RDC et étage



(b) Puissance de chauffage

**Figure 3.8** – Résultat de simulation de la maison I-DM, température d'air RDC et étage et puissance de chauffage



**Figure 3.9** – Comparaison mesure simulation pour le rayonnement incident Est et Ouest pour le 17 et 18 février 2011

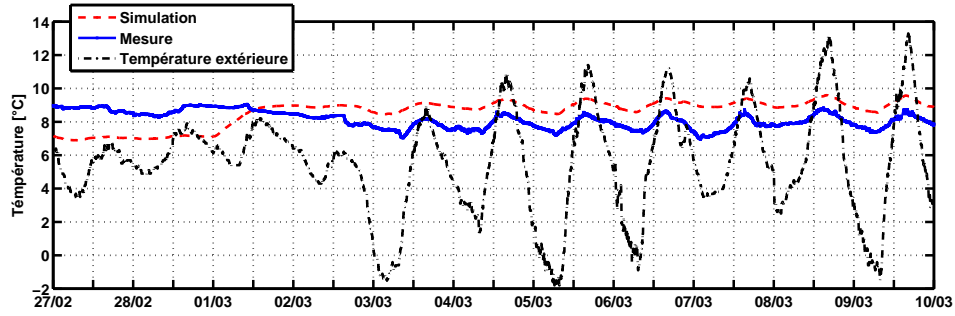
comparaison permet de tester le fichier météo et ainsi de quantifier les incertitudes sur les valeurs de rayonnement. Pour effectuer la comparaison, on considérera les façades Est et Ouest.

La figure 3.9 représente la comparaison entre la mesure et la simulation pour une journée avec du rayonnement direct et une sans, les 17 et 18 février 2011 pour les orientations Est et Ouest. Le 17 février, on observe des disparités entre les résultats alors que le 18 février, les résultats ont les mêmes tendances car c'est une journée à faible ensoleillement. Ces résultats permettent de conclure que le fichier météo créé pour EnergyPlus avec le rayonnement mesuré par la station météo du site d'INES est cohérent et correct avec une plage d'incertitude qui nous paraît faible.

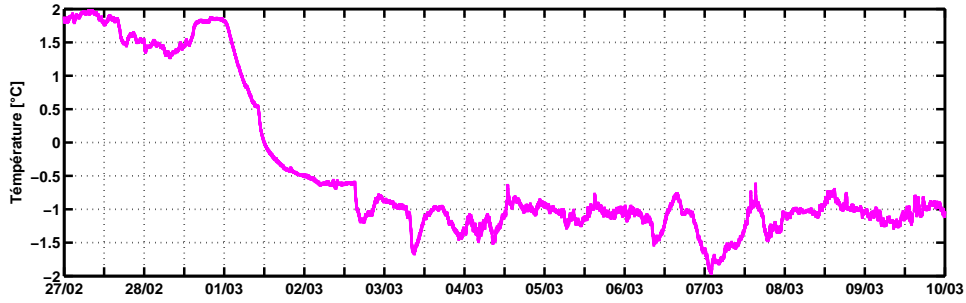
#### 3.4.4 Validation des zones non chauffées

L'instrumentation permet de mesurer les conditions aux limites du bâtiment. L'objectif de ce paragraphe est d'effectuer la comparaison entre la mesure et la simulation des zones non chauffées pour le cas de la maison I-DM. Ces zones thermiques ont été considérées comme non chauffées dans la simulation. Des écarts jusqu'à 0,5°C ont été observés entre le cas où le vide sanitaire et les combles sont considérés dans la simulation et le cas où le plancher du RDC et le plafond de l'étage sont en contact directement avec l'air à température extérieure.

**Le vide-sanitaire** Nous savons que deux paramètres sont très influents sur la température d'air du vide sanitaire : le débit de renouvellement d'air et la température du sol et on a considéré un débit de renouvellement d'air de 0.5V/h. Dans EnergyPlus, la température du sol est renseignée mensuellement et pour le mois de février on a une température de 6.6°C alors que pour le mois de mars elle est de 8.9°C ces températures ayant été calculées à l'aide d'un module supplémentaire d'EnergyPlus [2]. La figure 3.10a représente la comparaison entre la mesure et la simulation



(a) Température vide sanitaire mesure et simulation



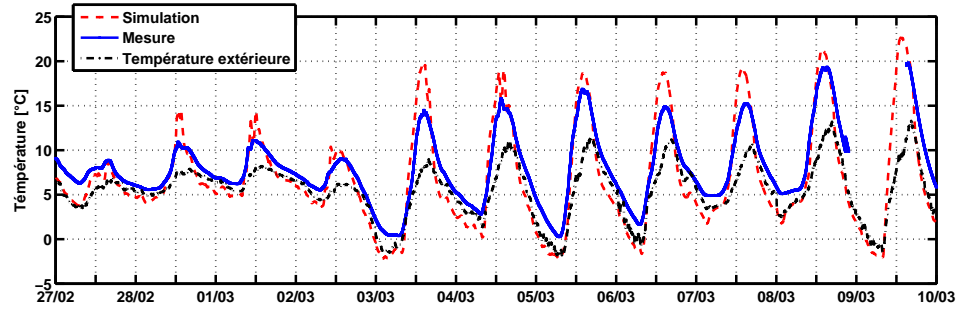
(b) Résidu

**Figure 3.10** – Comparaison entre la mesure et simulation pour la température d’air du vide-sanitaire et résidu

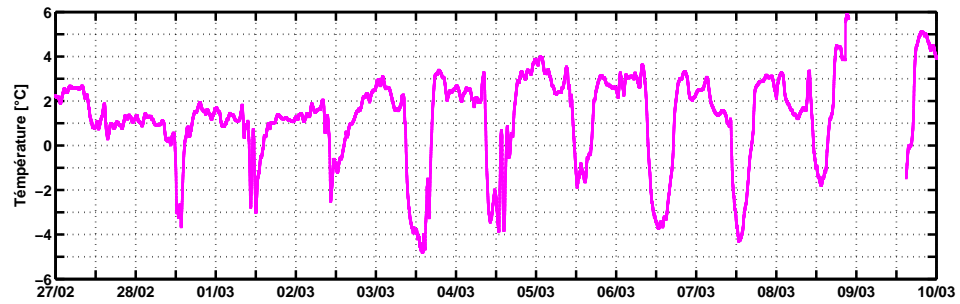
pour la température d’air du vide-sanitaire ainsi que la température extérieure du 27 février au 9 mars et la figure 3.10b représente le résidu qui est la différence entre la simulation et la mesure :

$$r(t) = y_{mesure}(t) - y_{simulation}(t) \quad (3.1)$$

Pour le vide sanitaire, la température d’air fluctue peu par rapport à la température extérieure. On observe une augmentation de la température d’air dans la simulation dès le changement de mois due à la modification de la température du sol. Le résidu est positif au mois de février et négatif au mois de mars et la valeur absolue du résidu est au maximum égale à 2°C. Le vide sanitaire est une zone non-chauffée et pour affirmer que la température d’air du vide sanitaire est non influente sur la température d’air du RDC, une simulation a été effectuée en considérant +1°C par rapport aux températures mensuelles du sol considéré dans la simulation précédente. Cette augmentation de température du sol a eu comme effet que la température du vide sanitaire était augmentée de 1°C tandis que l’augmentation pour la température d’air du RDC était au maximum égale à 0,05°C. On peut conclure qu’une variation de température du vide sanitaire de l’ordre du degré est non influente sur la température d’air de la maison.



(a) Température des combles mesure et simulation



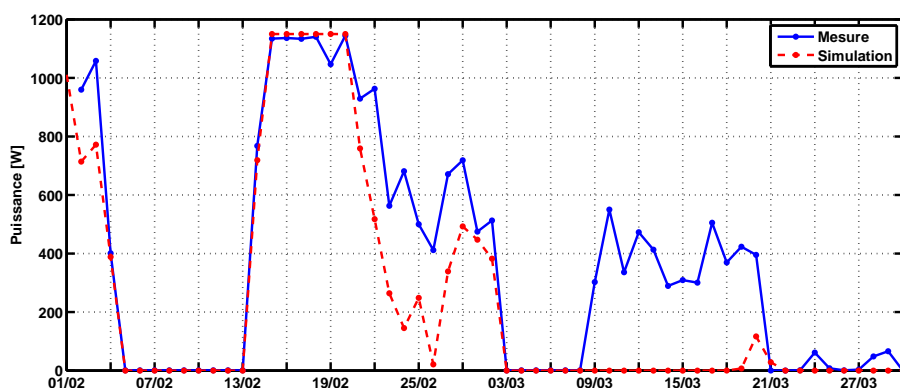
(b) Résidu

**Figure 3.11** – Comparaison entre la mesure et la simulation pour la température d'air des combles

**Les combles** Nous savons que le débit de renouvellement d'air influe beaucoup sur la température d'air des combles, il a été estimé égal à 2V/h. La figure 3.11a représente la comparaison entre la mesure et la simulation pour la température d'air des combles et la température extérieure du 27 février au 9 mars et la figure 3.11b représente le résidu.

Sur la figure 3.11a, on observe que la simulation a la même tendance que la mesure mais les pics de température au cours de la journée sont plus marqués. Le résidu diminue jusqu'à -5°C. Comme pour le vide-sanitaire, les combles sont une zone non-chauffée et pour affirmer que la température d'air des combles est non influente sur la température d'air de l'étage, une simulation a été effectuée en considérant un renouvellement d'air de 10V/h. Cette augmentation de débit a eu comme effet que la température des combles diminuait durant la journée avec des différences allant jusqu'à plus de 5°C tandis que la différence pour la température d'air de l'étage était très faible inférieure à 0,02°C. On peut conclure qu'une variation de la température des combles de l'ordre de 2°C est non influente sur la température d'air de la maison.

Une comparaison entre l'expérimentation et la simulation de la température d'air des zones tampons vient d'être réalisée. On observe des écarts entre les résultats allant jusqu'à quelques degrés Celsius mais au vu des épaisseurs d'isolant séparant



**Figure 3.12** – Comparaison entre la mesure et la simulation pour la puissance journalière de chauffage pour la maison I-DM

les zones tampons et les simulations effectuées montrant la faible influence de ces écarts sur le résultat, on considérera ces résultats comme satisfaisants. Nous allons maintenant étudier les résultats des zones chauffées.

### 3.4.5 Cas 1 : la maison double mur

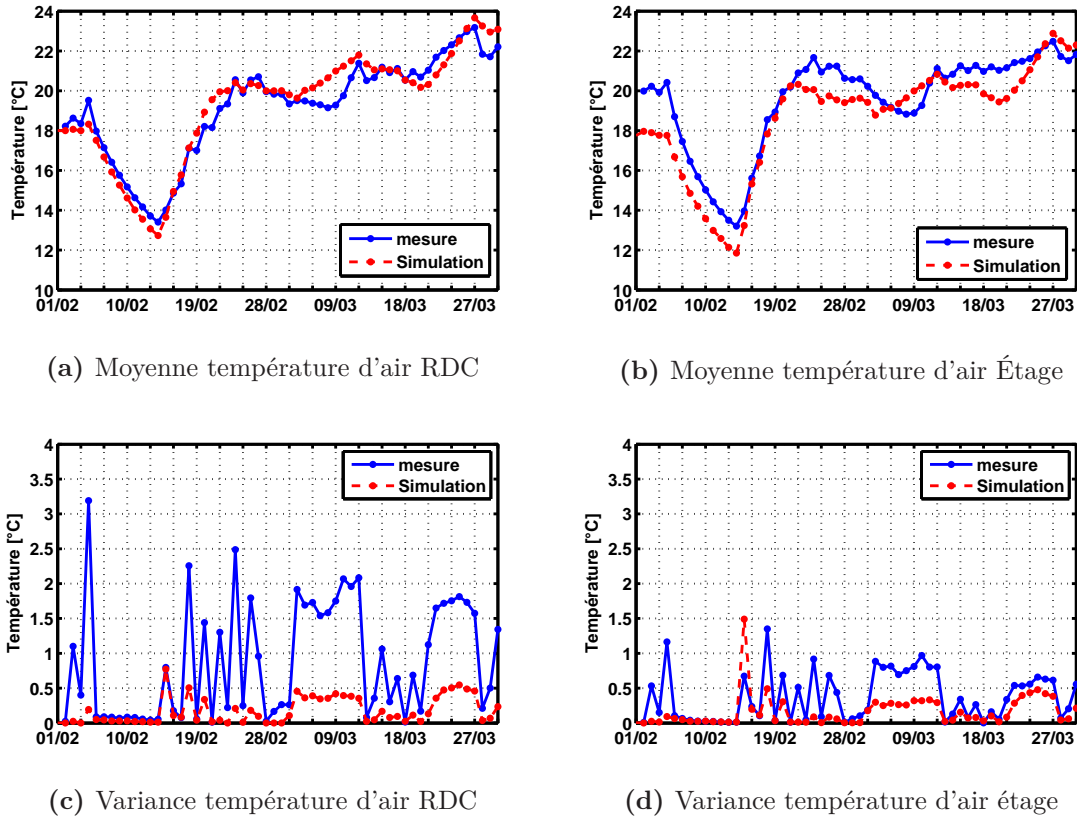
La maison I-DM sera traitée en premier. On s'est intéressé à trois variables :

1. les puissances de chauffage
2. la température d'air
3. la température dans le réseau aéraulique

1. **Les puissances de chauffage** La figure 3.12 présente la comparaison entre la simulation et la mesure de la puissance journalière de chauffage du 1<sup>er</sup> février au 30 mars 2011. Du 15 au 20 février, c'est la période de la relance de chauffage, les puissances de chauffage mesurées et prédites sont au maximum de leur puissance. Exception faite le 19 février, la puissance mesurée est inférieure à la puissance simulée. A partir du 10 mars, la température d'air prédite et mesurée dans les maisons est supérieure à la consigne (voir figure 3.13), néanmoins la résistance de chauffage fonctionne dans la maison.

Les écarts entre la mesure et la simulation pour la puissance de chauffage sont principalement dus à l'incertitude sur la température de consigne. Dans la simulation, la puissance de chauffage s'arrête ou diminue dès que la température de consigne égale à 20°C est atteinte. Dans la maison I-DM, la définition de la température de consigne est définie par un potentiomètre peu précis (voir chapitre 2).

2. **Les températures d'air** Pour effectuer la comparaison avec l'expérimentation pour le cas de la température d'air, c'est le capteur représentatif de chaque



**Figure 3.13** – Comparaison entre la simulation et la mesure pour la moyenne et la variance journalière des températures d'air du RDC et de l'étage pour la maison I-DM

niveau, déterminé dans le chapitre 2, qui a été choisi. Les figures 3.13a et 3.13b représentent la comparaison entre l'expérimentation et la simulation pour les moyennes journalières pour les températures d'air du RDC et de l'étage et les figures 3.13d et 3.13c représentent les variances journalières des températures d'air du RDC et de l'étage pour la période du 1<sup>er</sup> février au 30 mars 2011. La variance est la moyenne des carrés des écarts à la moyenne. Plus la variance est grande plus l'amplitude de température journalière est élevée.

**Incertitudes dues à la tache solaire** On observe que la variance de la simulation est faible par rapport à la variance de la mesure. Ces différences sont dues aux hypothèses de modélisation et principalement à l'incertitude due à la tache solaire. Dans la simulation, une zone est égale à un seul niveau. Le flux solaire est réparti uniformément dans toute la zone et une unique température est calculée pour la zone. Dans les maisons, la proportion de rayonnement est répartie entre les pièces en fonction de la superficie des vitrages. La zone repas a de nombreuses ouvertures sur l'extérieur et les amplitudes de températures journalières dues au rayonnement peuvent être élevées.

Pour la moyenne journalière de la température d'air de la zone du RDC la tendance est cohérente entre la mesure et la simulation sauf début mars où l'écart est supérieur à 1°C. Par contre pour la zone de l'étage, la prévision de la température est régulièrement inférieure de 2°C à la mesure.

Afin d'approfondir cette analyse, trois périodes ont été étudiées plus particulièrement du 11 au 17 février, du 23 au 28 février et du 23 au 28 mars. Chaque période représente des scénarios différents : période hors gel, période de relance de chauffage, période de respect de la consigne grâce à la résistance électrique et période d'évolution libre de la température. Chaque période est représentée par 4 figures : une comparaison entre mesure et simulation de la température d'air du RDC et de l'étage tout en considérant une plage d'incertitude sur la mesure, le calcul du résidu pour le RDC et l'étage et les conditions météorologiques pour la période étudiée. De plus sur les figures du résidu une plage d'incertitude de  $\pm 1^\circ\text{C}$  a été considérée permettant d'observer la bonne cohérence des résultats de simulation avec la plage d'incertitude de la mesure.

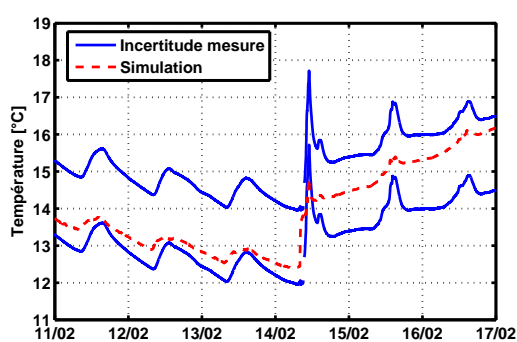
**Période hors gel et de relance de chauffage** La figure 3.14 représente la période du 11 au 17 février. Du 11 au 13 février, c'est le scénario hors gel, la consigne de chauffage est de 11°C, le débit de ventilation est de 90m<sup>3</sup>/h et les volets sont fermés. Du 14 au 17 février c'est un scénario normal, la consigne de chauffage est de 20°C, le débit de ventilation est de 135m<sup>3</sup>/h et les volets sont ouverts durant la journée et fermés la nuit.

La prédiction de la température d'air du RDC est proche de la mesure, le résidu est compris entre [-0,5 1,5] sauf pour le 14 février, c'est le jour de la relance du chauffage et de l'ouverture des volets. Pour la température d'air de l'étage, le résidu est compris entre [0,5 2].

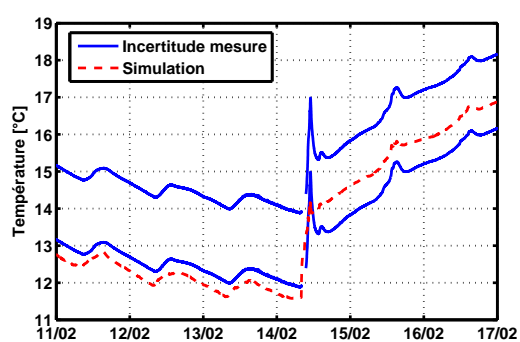
**Période de consigne de chauffage à 20°C** La figure 3.15 représente la période du 23 au 28 février. Durant cette période la maison I-DM est en scénario normal, la maison est maintenue à la température de consigne grâce à la résistance.

La prédiction de la température d'air du RDC est comprise dans la bande d'incertitude de la mesure. Pour l'étage, la température prédite est inférieure à la mesure. Sur les résidus, on observe des pics de température en cours de journée. Cela s'explique par l'incertitude due à la tache solaire expliquée précédemment. Sans considérer les pics de température les résidus sont compris entre [-1 2].

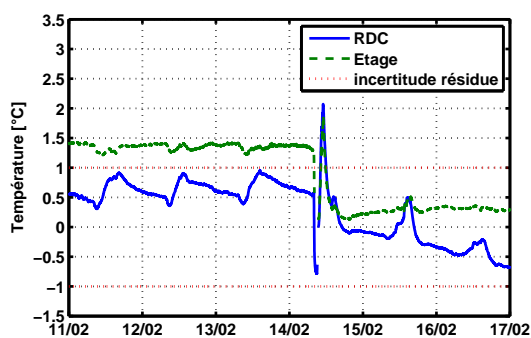
**Période d'évolution libre des températures** La figure 3.16 représente la période du 23 au 28 mars. Durant cette période la maison I-DM est en scénario normal et la température de la maison est en évolution libre, supérieure à la



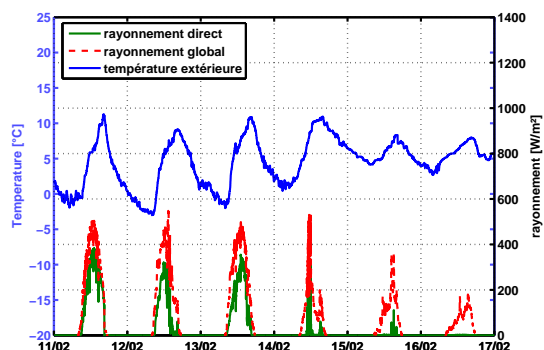
(a) Température d'air RDC



(b) Température d'air étage



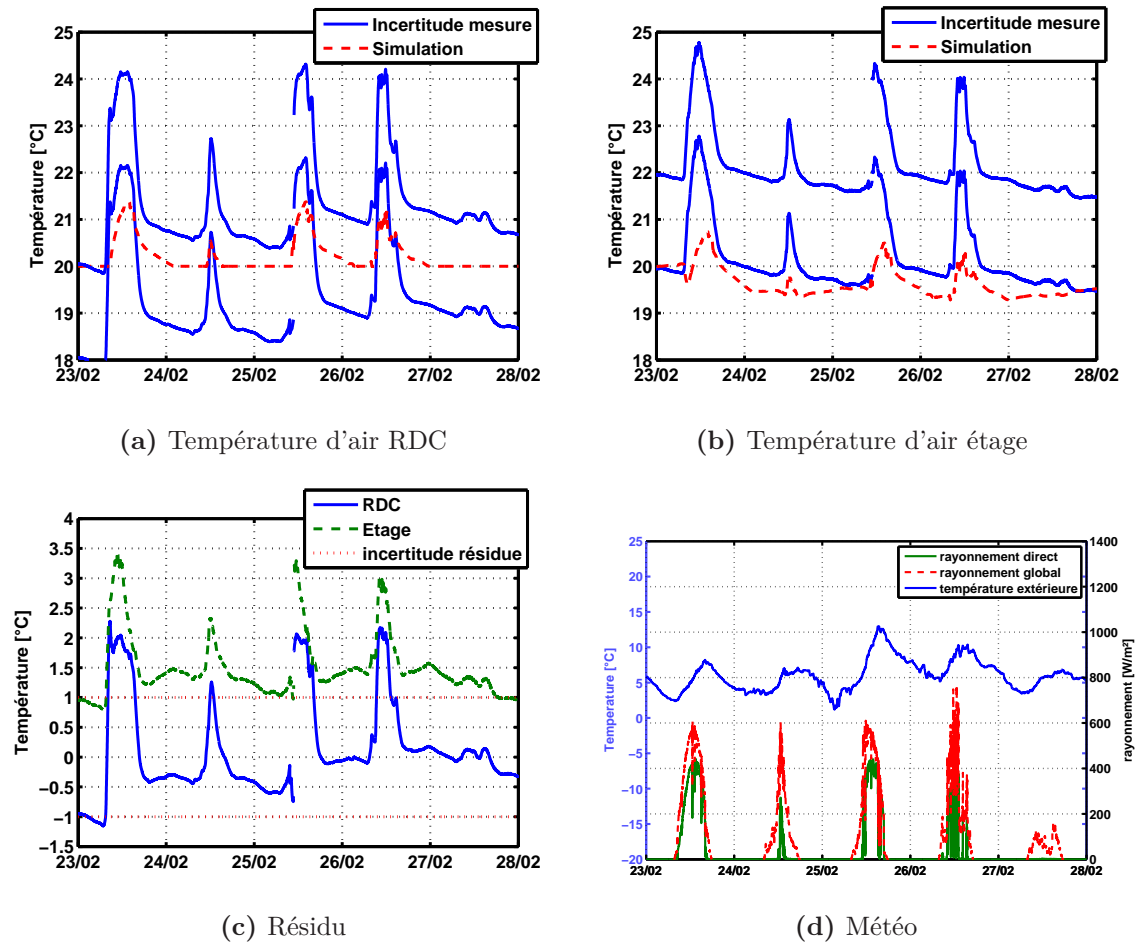
(c) Résidu



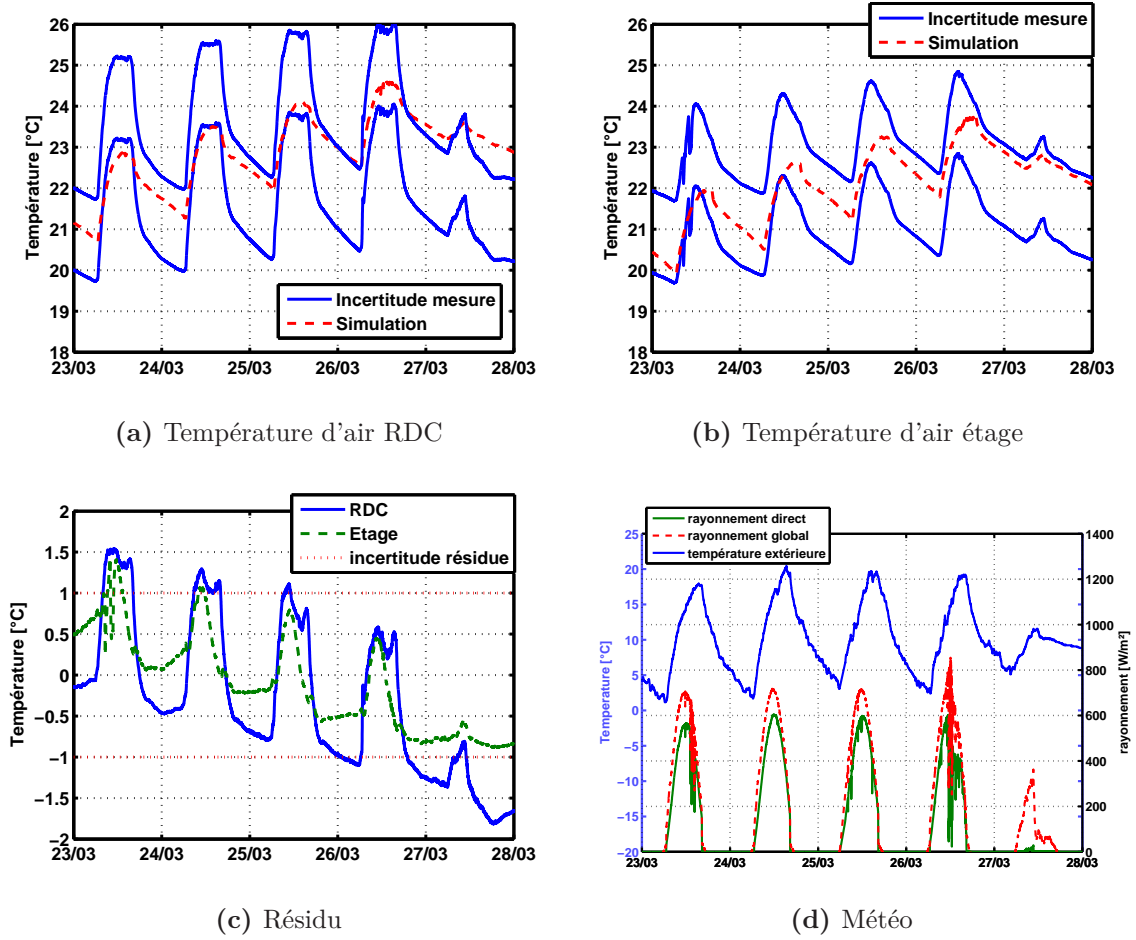
(d) Météo

**Figure 3.14** – Comparaison entre la simulation et une plage d'incertitude de la mesure de la température d'air du RDC et de l'étage, résidu du RDC et de l'étage et conditions météorologiques pour la maison I-DM du 11 au 17 février 2011





**Figure 3.15** – Comparaison entre la simulation et une plage d'incertitude de la mesure de la température d'air du RDC et de l'étage, résidu du RDC et de l'étage et conditions météorologiques pour la maison I-DM du 23 au 28 février 2011

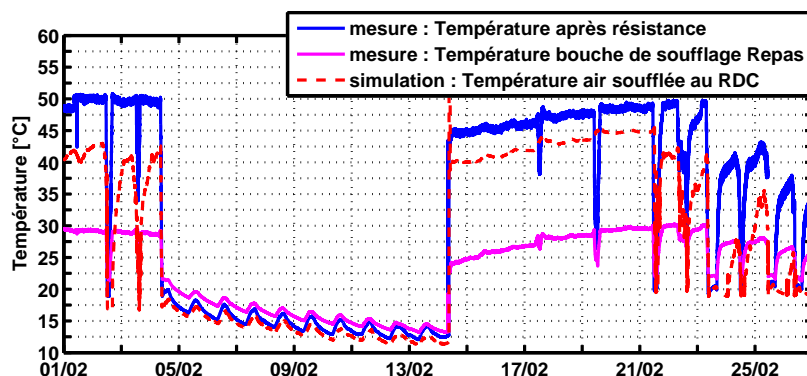


**Figure 3.16** – Comparaison entre la simulation et une plage d'incertitude de la mesure de la température d'air du RDC et de l'étage, résidu du RDC et de l'étage et conditions météorologiques pour la maison I-DM du 23 au 28 mars 2011

température de consigne.

La prédiction de la température d'air du RDC et de l'étage est une grande partie du temps de la période considérée comprise dans la plage d'incertitude des mesures. On observe toujours les pics de température dans les résidus. Les valeurs des résidus diminuent au cours de la période et sont compris une grande partie du temps dans la plage d'incertitude. Les résultats de simulation de la température d'air augmentent plus vite que la mesure.

Des écarts ont été observés durant les trois périodes étudiées. Les incertitudes dues à la modélisation de la tâche solaire ont été expliquées mais d'autres incertitudes peuvent expliquer les différences de résultats comme par exemple le réseau aéraulique qui peut comporter des erreurs dans la valeur du débit considéré et la valeur de l'efficacité de l'échangeur. Dans le chapitre 2, nous avons vu que ces mesures étaient sujettes à de nombreuses incertitudes. Pour amé-

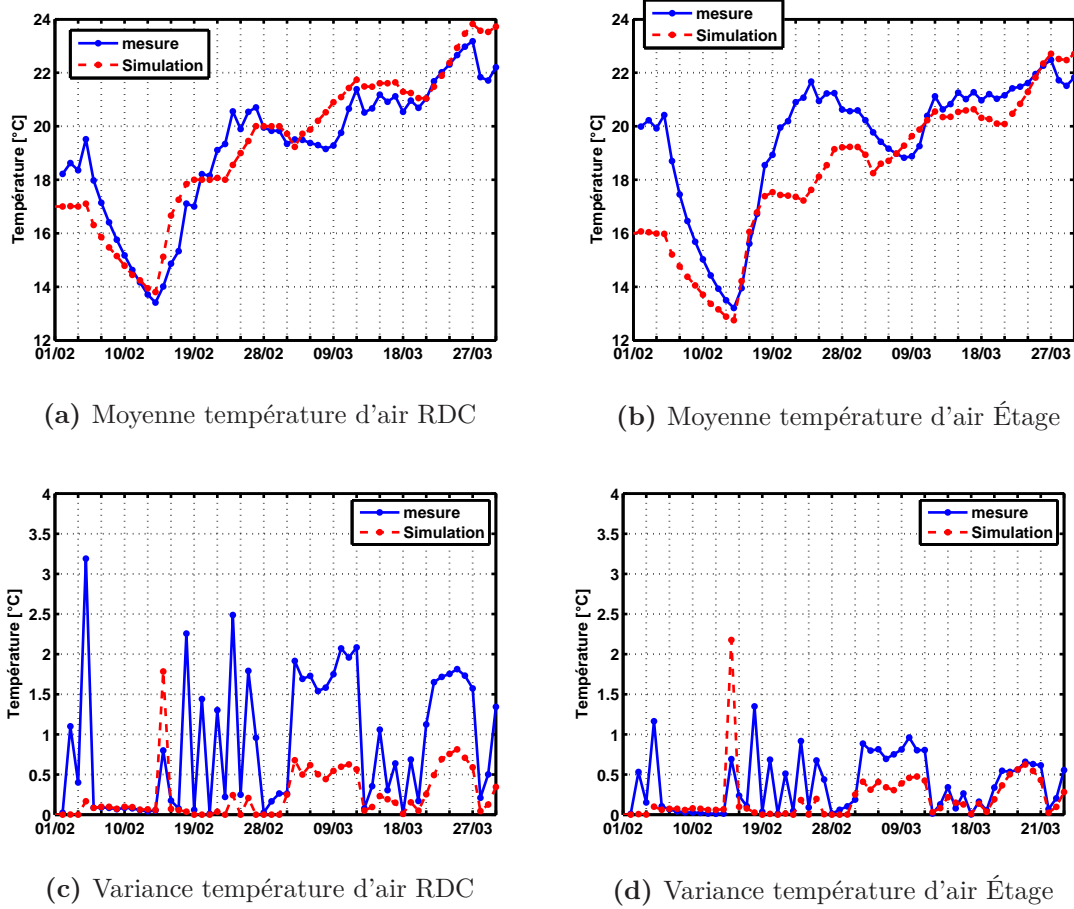


**Figure 3.17** – Comparaison entre la mesure et la simulation pour la température d’air soufflée au RDC de la maison I-DM

liorer le modèle numérique, il faudrait connaître l’influence de ces paramètres dont les valeurs sont incertaines pour savoir s’il y a un intérêt à améliorer la précision de leurs mesures.

3. **Réseau de ventilation** La figure 3.17 représente les températures d’air dans le réseau de ventilation pour le mois de février. Pour la mesure, deux températures sont représentées : la température d’air après la résistance et la température d’air à la bouche de soufflage de la zone repas. Pour la simulation, c’est la température d’air soufflée au RDC qui est représentée sur la figure. La température simulée est inférieure de 5°C à la température mesurée après la résistance électrique. Or ces deux températures devraient être équivalentes. Cet écart pouvant soit être dus à la puissance de la résistance électrique considérée inférieure dans la simulation à ce qui a été installé ou au fait que la température d’air mesurée soit biaisée par le rayonnement de la résistance. Dans la simulation la température d’air soufflée dans les zones est nettement supérieure à la réalité du fait certainement des nombreuses pertes dans le réseau non prises en compte dans la simulation ce qui explique la montée en température plus rapide au moment de la relance du chauffage le 14 février pour la simulation.

La comparaison entre l’expérimentation et la simulation pour le cas de la maison I-DM a été effectuée. On a observé que la simulation a la même tendance que les mesures néanmoins on remarque des disparités entre les résultats de l’expérimentation et de la prévision et on a pu identifier différentes sources d’incertitude. Tout en considérant une plage d’incertitude de mesure, on a pu remarquer que les résultats de simulation n’étaient pas toujours compris dans cette plage. Les résultats de comparaison ont-ils autant de disparité dans le cas de la maison I-BB ?

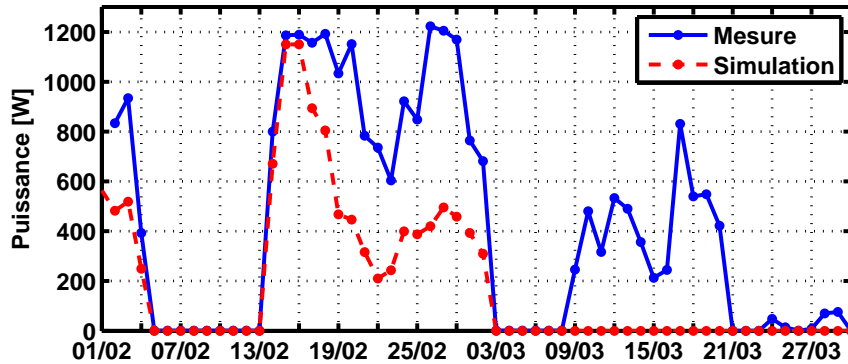


**Figure 3.18** – Comparaison entre la simulation et la mesure pour la moyenne et la variance journalière des températures d'air du RDC et de l'étage pour la maison I-BB

#### 3.4.6 Cas 2 : la maison en béton banché

Pour le cas de la maison I-BB, après le 14 février, la température de consigne a été modifiée le 23 puis le 25 février afin d'atteindre la température de consigne égale à 20°C. Pour la simulation les mêmes scénarios ont été considérés et on analyse uniquement la température d'air et la puissance de chauffage.

**Température d'air** La figure 3.18 représente la comparaison entre l'expérimentation et la simulation pour les moyennes et les variances journalières pour les températures d'air du RDC et de l'étage du 1<sup>er</sup> février au 30 mars 2011. On observe de gros écarts entre les résultats de mesure et de simulation. Si les résultats pour le RDC sont à peu près cohérents entre la mesure et la simulation, ce n'est pas le cas pour l'étage. Pour la variance, les mêmes phénomènes par rapport à la I-DM sont observés et elle est très faible par rapport à la mesure.



**Figure 3.19** – Comparaison entre la mesure et la simulation pour la puissance journalière de chauffage pour la maison I-BB

**Puissance de chauffage** La figure 3.19 représente la comparaison entre la simulation et la mesure de la puissance journalière du 1<sup>er</sup> février au 30 mars 2011. A partir du 10 mars les températures d'air prédites et mesurées dans les maisons sont supérieures à la consigne. On observe les mêmes résultats que pour la maison I-DM. Dans la simulation à partir du 10 mars, la résistance électrique ne se met plus en route. Pour la période de la relance de chauffage (à partir du 14 février), les puissances de chauffage mesurées et prédites sont au maximum.

Dans le cas de la modélisation des maisons I-DM et I-BB, on se rend compte de toute la difficulté de la comparaison entre la mesure et la simulation. Les écarts entre les mesures et la simulation sont importants, mais il est impossible de connaître à ce stade les paramètres influençant le plus les sorties du modèle pour améliorer le modèle numérique.

### 3.5 Conclusion

EnergyPlus, l'outil qui a été choisi pour effectuer ces travaux, a fait l'objet de nombreuses validations et est adapté pour la modélisation de bâtiments à faible consommation énergétique. Une attention particulière doit être portée à la phase d'initialisation de la simulation. Pour effectuer une comparaison entre l'expérimentation et la simulation, un fichier météo a été créé à l'aide des mesures du site d'INES. Malgré les incertitudes de mesure des stations météo, on observe une cohérence entre le calcul du rayonnement incident et les pyranomètres installés sur la maison I-DM. Les hypothèses de modélisation des maisons INCAS ont été présentées et on a vu qu'elles sont sujettes à de nombreuses incertitudes.

Une comparaison entre l'expérimentation et la prévision des maisons I-DM et I-BB a été effectuée. On remarque des disparités entre les résultats de l'expérimentation et la prévision. Dans le cas de la maison I-DM, on a pu remarquer que les résultats de simulation étaient inclus la plupart du temps de la plage d'incertitude de la mesure.

Dans le cas de la maison I-BB il y a plus de disparité entre les résultats. Dans le cas de la comparaison avec les maisons I-DM et I-BB, des incertitudes de mesures ont été prises en compte mais aucune incertitude n'a été considérée dans les résultats de simulation. De nombreuses interrogations subsistent : les incertitudes de la simulation recourent-elles les incertitudes de mesures ? Quels sont les paramètres ayant le plus d'influence sur les résultats de simulation ? Quels sont les paramètres ayant peu voire pas d'influence sur les résultats de simulation ? Comment améliorer les résultats de la prévision ? C'est à toutes ces questions que l'on va tenter de répondre maintenant.

Les modèles des maisons I-DM et I-BB seront à nouveau utilisés dans le prochain chapitre qui présentera une méthodologie permettant d'identifier les paramètres influents et d'identifier une plage d'incertitude des résultats de simulation.



## CHAPITRE 4

---

### Simulations et étude des paramètres influents des maisons INCAS

---

*Ce chapitre présente la méthodologie qui a été mise en place pour évaluer les incertitudes associées aux prévisions. Elle sera appliquée au besoin de chauffage pour trois bâtiments ainsi qu'à la température d'air de la maison I-DM. Trois méthodes d'analyses de sensibilité seront appliquées, l'analyse de sensibilité locale, l'analyse d'incertitude et l'analyse de sensibilité globale.*



## 4.1 Démarche d'évaluation des incertitudes

Aujourd'hui, l'utilisation de la simulation numérique des bâtiments permet d'obtenir une prédiction de la consommation énergétique. Ces simulations numériques mettent en jeu un grand nombre de paramètres sujets à de nombreuses incertitudes comme vu dans le chapitre précédent. Ces incertitudes peuvent être dues soit à une mauvaise connaissance du paramètre d'entrée soit à une mauvaise prise en compte du phénomène physique. Or ces incertitudes peuvent jouer un rôle non négligeable sur la prédiction finale et donc sur le processus de décision.

Dans ces simulations, on montrera qu'un jeu réduit de paramètres a une influence prédominante (vis à vis des autres paramètres) et les analyses de sensibilité permettent de les identifier. Une meilleure connaissance des paramètres influents permettra une meilleure prédiction. Une analyse d'incertitude permet de caractériser la réponse d'un modèle dans un intervalle de confiance connaissant à priori l'incertitude des paramètres d'entrées. Les analyses de sensibilité et les analyses d'incertitude permettent dans le cadre d'une expérimentation d'améliorer le comportement entre le modèle et la mesure, on peut alors parler de validation du modèle (voir partie 3.1). Fürbringer (1999) [25] définit les analyses de sensibilité comme essentielles dans le domaine de la simulation du bâtiment et il est nécessaire de les implémenter directement dans les outils.

Dans ces travaux afin d'évaluer et de hiérarchiser les incertitudes sur les résultats des simulations en phase de conception, la démarche qui a été mise en place consiste en trois étapes et a été appliquée à deux cas d'études :

1. L'analyse de sensibilité locale consiste à identifier parmi l'ensemble des paramètres du modèle ceux qui ont une influence sur le résultat qui nous intéresse. Cette méthode a été utilisée car elle est simple à mettre en place et permet de connaître le signe de l'effet du paramètre sur la sortie du modèle. C'est la méthode de perturbation d'un paramètre à la fois qui a été utilisée et la valeur de la perturbation est égale à 1% de la valeur nominale du paramètre.
2. L'analyse d'incertitude consiste à évaluer les incertitudes associées aux paramètres les plus influents afin de propager cette incertitude dans le code de calcul et évaluer l'incertitude sur le résultat. Cette étape est effectuée au moyen de l'approche probabiliste de Monte Carlo avec laquelle 2000 simulations sont effectuées pour obtenir un résultat fiable.
3. L'analyse de sensibilité globale consiste à évaluer la responsabilité de chacun des paramètres sur les incertitudes associées au résultat. La méthode FAST puis SOBOL a été utilisée. Ces deux méthodes se basent sur l'étude de la variance consistant à déterminer quelle part de la variance de la réponse est due à la variation de chaque paramètre. La méthode FAST est plus précise que celle de SOBOL [42] mais elle n'a pu être utilisée dans les deux cas d'études en raison de problèmes numériques.

Dans le premier cas d'étude, on s'est intéressé à trois bâtiments et aux sorties numériques du besoin de chauffage et du confort d'été et dans le deuxième cas, l'étude a porté sur la température d'air de la maison I-DM.

## 4.2 Cas 1 : Incertitude sur les besoins en chauffage et le confort dans trois bâtiments

Dans cette partie, on s'est intéressé à chercher les paramètres influents sur le besoin de chauffage et le confort d'été pour trois bâtiments. Nous avons considéré trois maisons ayant la même géométrie que les maisons INCAS mais des modes constructifs différents. Les maisons sont :

- la maison INCAS DM
- la maison INCAS BB
- une maison RT 2005 : c'est une maison ayant la même géométrie que les maisons INCAS mais avec un mode constructif respectant la RT 2005

Le but est de comparer les paramètres influents pour deux bâtiments à faible consommation mais ayant des principes constructifs différents, la maison I-DM et I-BB, ainsi que pour le cas d'un bâtiment respectant la RT2005 pour identifier si avec l'augmentation de la performance énergétique des bâtiments certains paramètres sont devenus prépondérants dans le cas du besoin de chauffage et du confort d'été.

L'effet des charges internes sur les sorties du modèle numérique n'a pas été pris en compte dans cette partie d'étude. Nous avons considéré un scénario d'occupation et de dégagement de chaleur équivalent à une famille de 4 personnes économe en énergie. La thèse de J. Page [51](2007) a été consacrée au sujet de la simulation du comportement des occupants dans les bâtiments. Le traitement des occupants est un sujet à part entière et dans cette partie nous avons préféré nous intéresser à l'évaluation de la performance des matériaux de construction et des systèmes énergétiques.

### 4.2.1 Description des bâtiments considérés

#### 4.2.1.1 Enveloppes

**Maison I-DM et maison I-BB** La description de l'enveloppe des maisons I-DM et I-BB est présentée dans la partie 2.1.2.2, pages 35 et 36.

**Maison RT 2005** La maison est construite en parpaing et isolée par 8cm de laine de verre par l'intérieur. La structure porteuse du plafond de l'étage est en bois. Les combles sont isolés par 12cm de laine de verre et le plancher est isolé par 10cm de polystyrène expansé. Les menuiseries sont identiques aux maisons I-DM et I-BB avec des doubles vitrages 4-16-4 à faible émissivité avec remplissage en argon sur toutes les faces. Le débit d'infiltration est égale à 0.22vol/h qui correspond à un débit de fuite égal à  $I_4=0.8 \text{ (m}^3\text{/(h.m}^2\text{))}$  à 4 Pa. Le renouvellement d'air est assuré

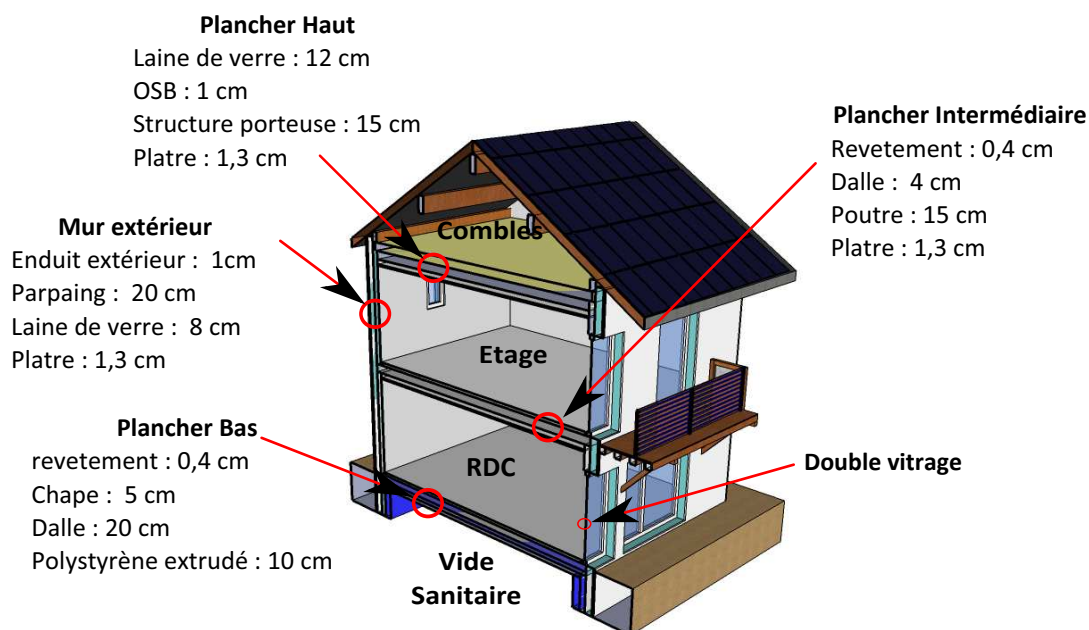


Figure 4.1 – Enveloppe de la maison RT 2005

par un système de ventilation à simple flux avec un débit égal à  $0,6V/h$ . La figure 4.1 représente les principaux matériaux utilisés pour la maison RT 2005.

#### 4.2.1.2 Scénarios

Nous avons considéré des profils fixes de charges internes pour les trois bâtiments correspondant à une famille de 4 personnes ayant des appareils économes en énergie. Le tableau 4.1 représente les charges internes dues à l'électroménager et la figure 4.2 représente le scénario de puissance dissipée en fonction de l'heure et de la journée de la semaine. Le tableau 4.2 représente les puissances dissipées par les occupants et la figure 4.3 représente le scénario d'occupation.

Zone	Équipement	Apport [W]	Fréquence
chambre	éclairage	20	par chambre
salle de Bain	éclairage	20	par chambre
	lave linge	500	3 fois par semaine
cuisine	réfrigérateur	40	constant
	électroménager cuisine matin	500	1h matin
	électroménager cuisine journée	1000	1h midi et soir
	lave vaisselle	500	3 fois par semaine
séjour	éclairage	40	constant
	box Internet	10	constant
	ordinateur	50	constant
	TV	50	constant

Table 4.1 – Tableau des charges internes dues à l'électroménager

## 4.2 Cas 1 : Incertitude sur les besoins en chauffage et le confort dans trois bâtiments

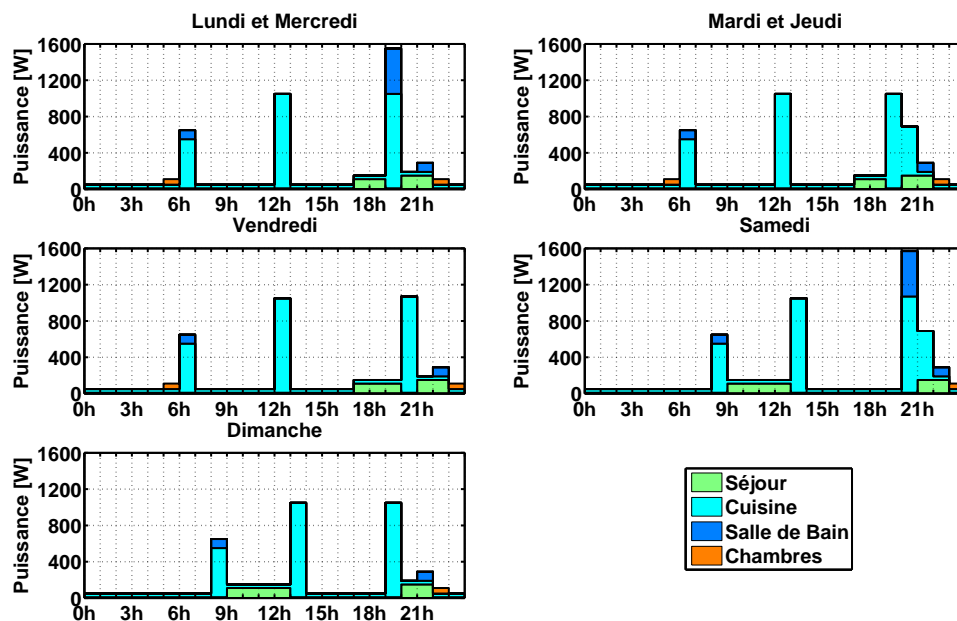


Figure 4.2 – Scénario de dégagement des charges internes dues à l'électroménager

Activité métabolique	Zone	Puissance [W/personne]
Repos couché	Chambre	80
Repos assis	cuisine	120
	séjour	120
Activité légère debout	salle de bain	160

Table 4.2 – Tableau des charges internes dues aux occupants

### 4.2.1.3 Hypothèses de simulation

Pour les maisons I-DM et I-BB les hypothèses de simulation décrites dans la partie 3.3 ont été considérées. Pour la maison RT 2005, les mêmes hypothèses décrites dans la partie 3.3 ont été considérées sauf pour le système énergétique. Pour la gestion des volets, ils sont fermés lorsque le rayonnement solaire horizontal était supérieur à  $300\text{W/m}^2$ .

Pour s'affranchir des problèmes dus à l'initialisation, pour la maison I-DM et I-BB, la simulation commence le 1<sup>er</sup> mai et pour la maison RT 2005 le 1<sup>er</sup> juin et elles finissent respectivement le 30 avril et le 31 mai.

### 4.2.1.4 Résultats de simulation

Pour chaque maison, le besoin de chauffage et le confort d'été ont été déterminés. Nous avons considéré les dimensions intérieures de  $97.5\text{m}^2$  pour déterminer le besoin

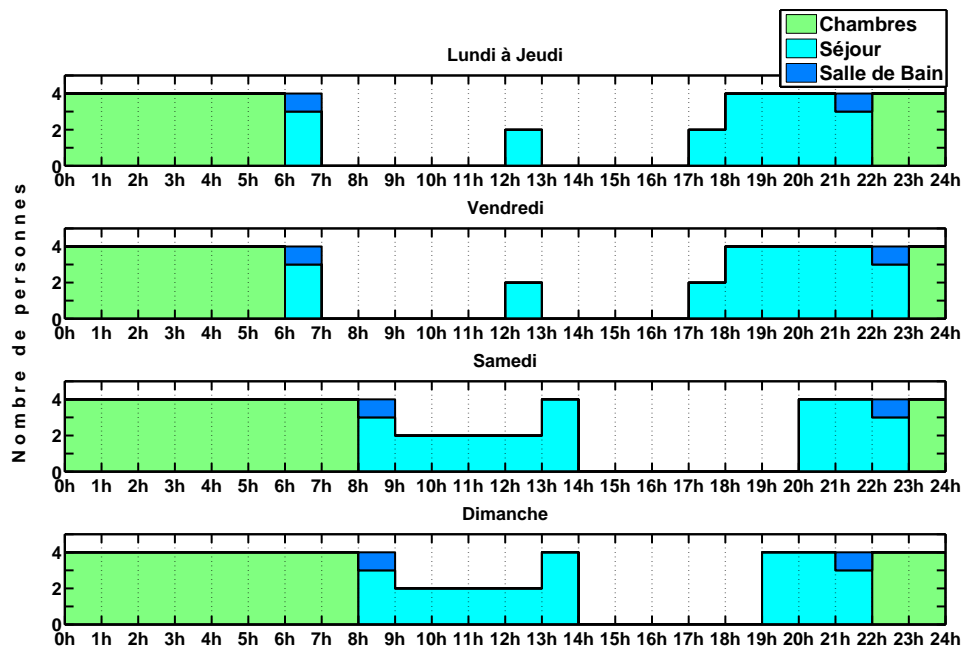


Figure 4.3 – Scénario d'occupation

de chauffage unitaire kWh/(m<sup>2</sup>.an). Pour déterminer l'inconfort d'été, on détermine deux paramètres :

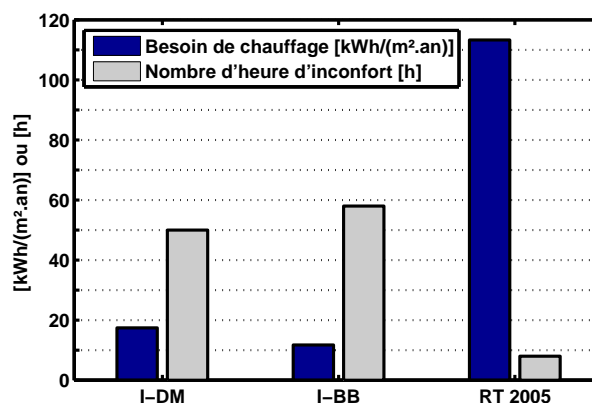
- le nombre d'heure où la température est supérieure à 27 °C
- les degrés heures d'inconfort correspondant à la somme des écarts positifs de température entre la température d'air intérieur du RDC et 27 °C

Les résultats des simulations des trois maisons sont représentés sur la figure 4.4 sous forme de tableau et de graphique. La maison I-BB a un besoin de chauffage égal à 11.7kWh/(m<sup>2</sup>.an) inférieur à la maison I-DM dont le besoin est de 17,4kWh/(m<sup>2</sup>.an). Par contre le confort d'été de la I-BB est légèrement diminué et il y a une différence de 8h sur le nombre d'heures d'inconfort entre la I-DM et la I-BB. La maison RT 2005 a un besoin de chauffage de 113.3kWh/(m<sup>2</sup>.an) avec un nombre d'heures d'inconfort presque nul, égal à 8h.

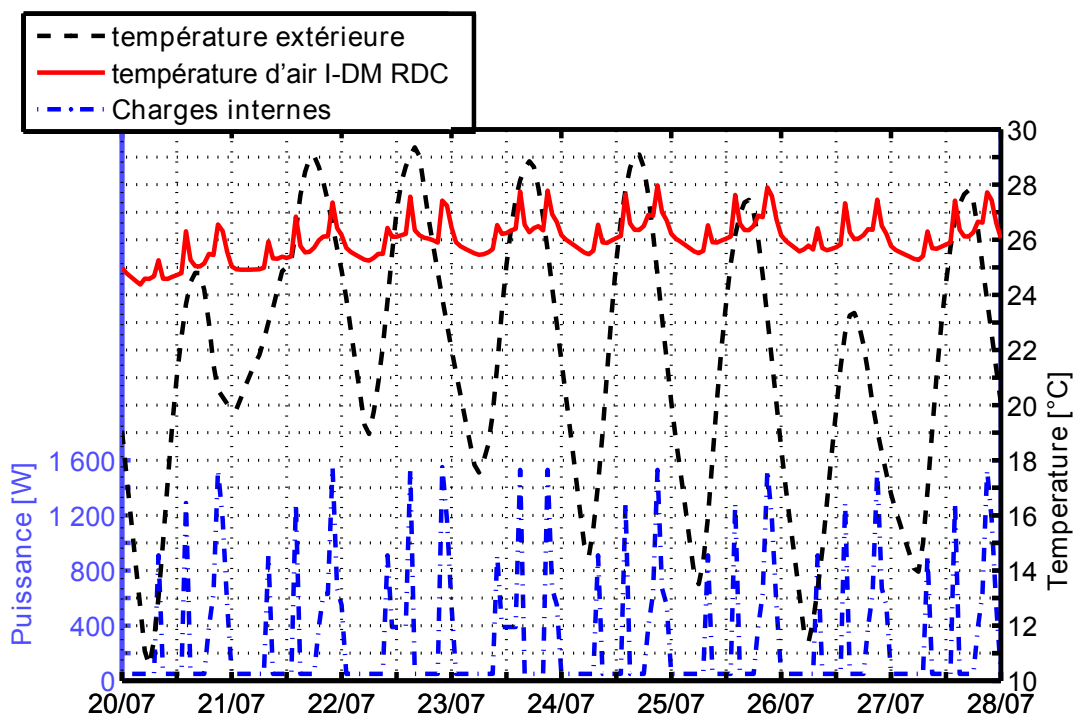
Ces résultats montrent que dans un bâtiment à faible consommation énergétique, le besoin de chauffage est diminué mais le confort thermique est dégradé. Dans le modèle numérique aucune gestion de ventilation naturelle n'est considérée. La figure 4.5 présente la température intérieure au RDC de la maison I-DM, la température extérieure et les charges internes dégagées au RDC durant 7 jours en été. On observe que la température intérieure des maisons ne dépasse jamais 28°C et en moyenne la température est de 26°C alors que la température extérieure est inférieure à 20°C la nuit. Par une gestion optimisée des ouvrants la nuit, le débit de ventilation naturelle serait suffisant pour refroidir la maison afin de permettre une amélioration du niveau de confort. La modélisation de la ventilation naturelle reste très délicate et n'a pas été prise en compte dans ces travaux.

## 4.2 Cas 1 : Incertitude sur les besoins en chauffage et le confort dans trois bâtiments

Sorties considérées	I-DM	I-BB	RT 2005
Besoin de chauffage [kWh/(m <sup>2</sup> .an)]	17,4	11,7	113,3
degré heure d'inconfort [° h]	24,1	25,8	2,2
Nombre d'heure d'inconfort [h]	50	58	8



**Figure 4.4** – Résultats de simulations pour les 3 maisons étudiées : besoin de chauffage et nombre d'heure d'inconfort



**Figure 4.5** – Température intérieure au RDC de la maison I-DM, température extérieure et charges internes dégagées au RDC du 20 au 28 juillet

Les trois bâtiments étudiés ont des modes constructifs et des performances thermiques différentes. On va maintenant rechercher quels sont les paramètres les plus influents sur le besoin de chauffage et le confort d'été dans ces différents bâtiments.

## 4.2.2 Recherche des paramètres influents

### 4.2.2.1 Analyse de sensibilité locale

Pour déterminer les paramètres les plus influents pour le besoin de chauffage et pour le confort d'été des trois bâtiments étudiés, la méthode d'analyse de sensibilité locale présentée en partie 1.4.1.2 a été utilisée. On s'est intéressé à la méthode de perturbation d'un paramètre à la fois. La valeur de la perturbation est égale à 1% de sa valeur nominale.

### 4.2.2.2 Paramètres étudiés

Nous avons étudié un à un l'influence des mêmes paramètres sur le comportement des trois maisons I-DM, I-BB et RT 2005. Les paramètres considérés sont :

- la conductivité, l'épaisseur, la masse volumique, la chaleur spécifique des matériaux opaques
- pour les enduits intérieurs et extérieurs l'absorptivité et l'émissivité
- pour les matériaux translucides les propriétés physiques des vitrages : transmission, réflexion, épaisseur, conductivité....
- les caractéristiques des volets : épaisseur, transmission, réflexion, conductivité, émissivité, distance entre le volet et le vitrage
- la résistance thermique de la porte d'entrée
- les débits de ventilation et d'infiltration
- les coefficients de convection : vertical, horizontal intérieur comme extérieur
- l'albédo
- l'angle du bâtiment par rapport au Nord
- pour les maisons I-DM et I-BB
  - la répartition du débit de ventilation entre les zones du rez-de-chaussée et de l'étage
  - l'efficacité de l'échangeur

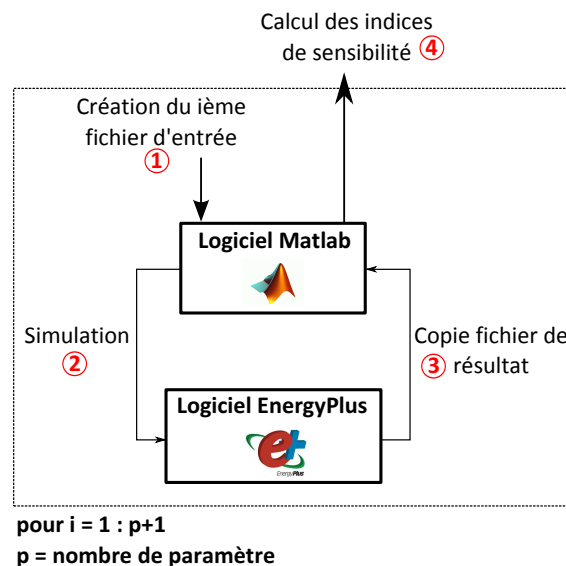
Le nombre de paramètres considérés pour chaque maison est :

- 142 paramètres pour la I-DM
- 146 paramètres pour la I-BB
- 117 paramètres pour la maison RT 2005

L'étude s'est portée sur le besoin de chauffage et le degré d'heure d'inconfort.

### 4.2.2.3 Mise en place des séries de simulations

Pour effectuer les simulations en série, un couplage a été effectué entre l'outil Matlab et EnergyPlus. Différentes étapes sont nécessaires pour obtenir le résultat de l'indice de sensibilité locale. La figure 4.6 présente le couplage et les 4 étapes nécessaires :



**Figure 4.6** – Étape pour obtenir les résultats de l’analyse de sensibilité locale

1. Création du fichier d’entrée : les fichiers d’entrées d’EnergyPlus sont des fichiers textes caractérisés par l’extension « .idf ». Un seul fichier est créé dans lequel chaque valeur de paramètre étudié est remplacée par une chaîne de caractères caractéristique, l’outil Matlab remplace ces chaînes de caractères par l’ensemble des valeurs prédéfinies pour la configuration  $i$ .
2. Simulation : EnergyPlus effectue la simulation en considérant le fichier idf créé à l’étape 1.
3. Récupération des résultats : EnergyPlus crée un fichier csv de résultat, à cette étape on stocke les résultats.  
Ces trois premières étapes sont répétées en fonction du nombre de paramètres considérés dans l’analyse de sensibilité locale.
4. Calcul des indices de sensibilité : à l’aide de Matlab on extrait les résultats pour chaque simulation et on calcule les indices de sensibilité locale.

#### 4.2.2.4 Résultats de l’analyse de sensibilité locale

Les résultats sont représentés sur les figures 4.8 à 4.13 sur chaque figure est représenté le résultat de l’indice de sensibilité des 26 paramètres les plus influents pour le besoin de chauffage ou les degrés heures d’inconfort pour chaque maison. Les paramètres sont triés par ordre décroissant selon leur valeur absolue d’indice de sensibilité. Le signe de l’indice de sensibilité renseigne sur l’effet du paramètre sur la sortie. Si l’indice de sensibilité est positif, le fait de perturber le paramètre de  $\Delta X_i = 1\%$  augmente la sortie du modèle. Si l’indice de sensibilité est négatif, le fait de perturber le paramètre de  $\Delta X_i = 1\%$  diminue la sortie du modèle, chaque paramètre étant représenté par une couleur et un numéro de classement.

Pour différencier les groupes de paramètres un code couleur a été mis en place. Le code couleur est représenté sur la figure 4.7. Les couleurs bleues représentent



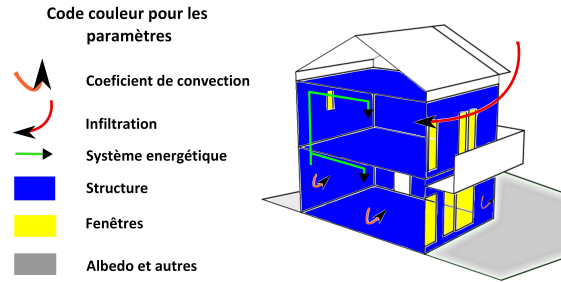


Figure 4.7 – Code couleur pour les paramètres pour l’analyse de sensibilité locale

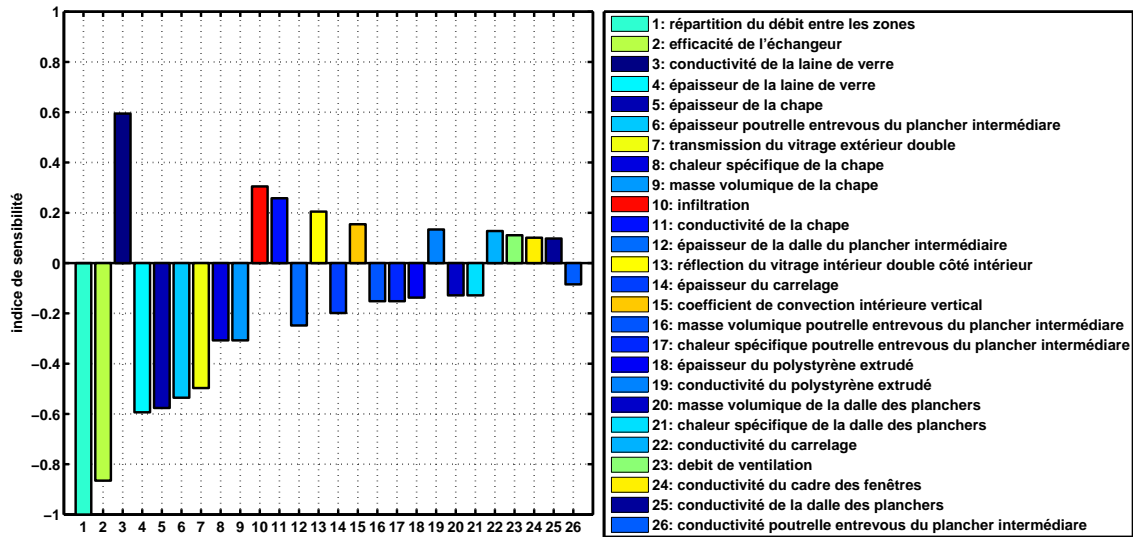


Figure 4.8 – Résultat de l’analyse de sensibilité locale pour le besoin de chauffage pour la maison I-DM

les paramètres de la structure, les couleurs jaunes des fenêtres, les vertes des systèmes énergétiques, le rouge les défauts d’étanchéité, les oranges les coefficients de convection et les grises l’albédo et autres. L’indice de sensibilité locale renseigne sur l’influence du paramètre à la sortie du modèle et permet de classer les paramètres par ordre d’influence. Pour normaliser les valeurs des indices entre -1 et 1, le calcul suivant a été effectué :

$$S_i(t) = \frac{X_i \frac{\Delta y_k(t)}{\Delta X_i}}{S_{max}(t)} \quad (4.1)$$

**Étude sur le besoin de chauffage :** Les figures 4.8, 4.9 et 4.10 présentent les résultats des paramètres influents pour les besoins de chauffage pour les trois bâtiments.

**Maison I-DM : figures 4.8** Pour le besoin de chauffage de la maison I-DM, les familles des paramètres les plus influents sont :

## 4.2 Cas 1 : Incertitude sur les besoins en chauffage et le confort dans trois bâtiments

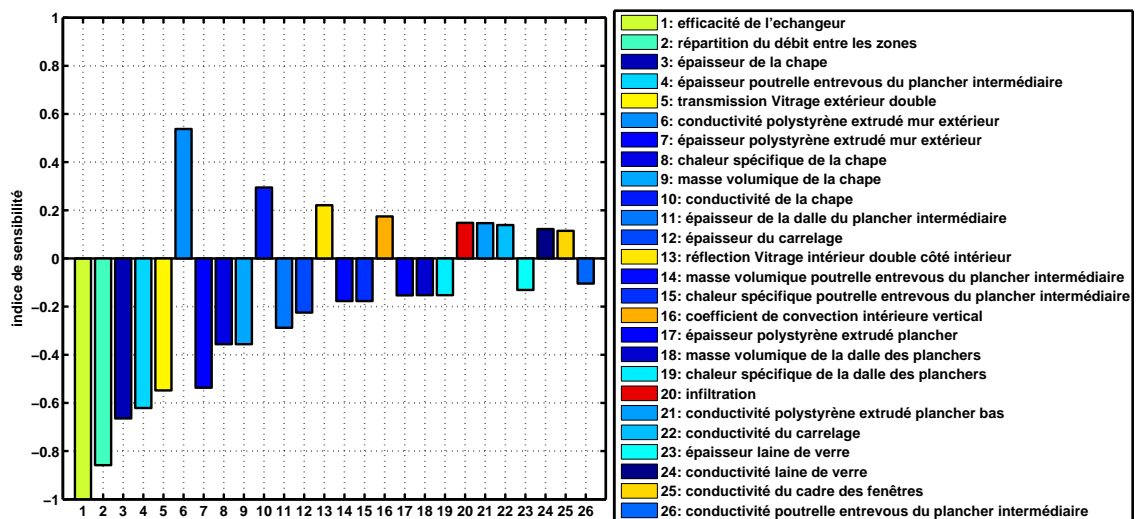


Figure 4.9 – Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour le besoin de chauffage pour la maison I-BB

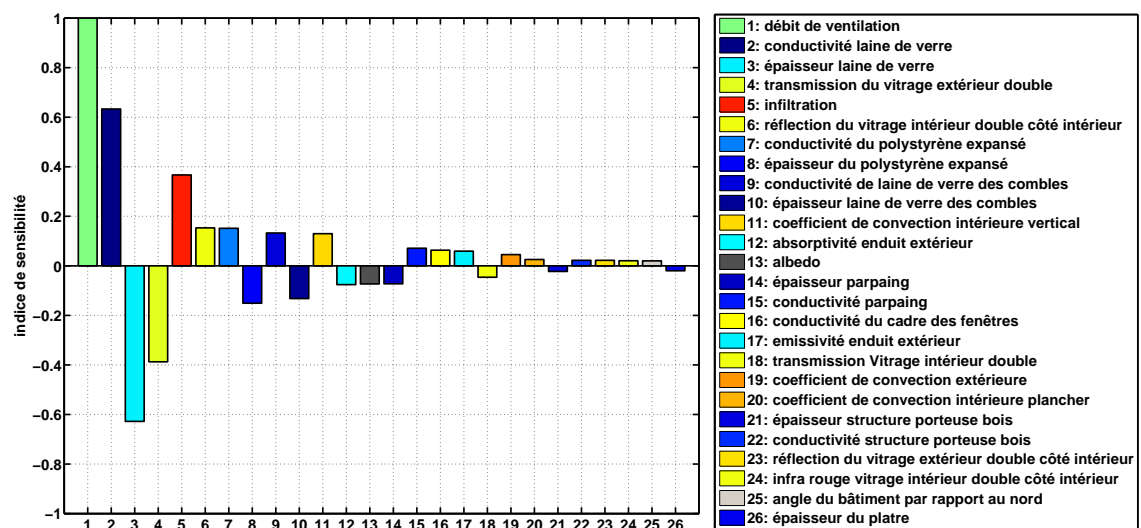


Figure 4.10 – Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour le besoin de chauffage pour la maison RT2005

- les paramètres relatifs au système énergétique
  - la répartition du débit entre les zones
  - l’efficacité de l’échangeur
- les paramètres relatifs à l’isolation du bâtiment
  - l’épaisseur de la laine de verre
  - la conductivité de la laine de verre
- les paramètres relatifs à l’inertie du bâtiment
  - caractéristiques physique de la chape
  - épaisseur des poutrelles entrevous du plancher intermédiaire
  - dalle du plancher intermédiaire
- les paramètres influents relatifs aux caractéristiques physiques des vitrages
  - la transmission du vitrage extérieur
  - la réflexion du vitrage intérieur
- le paramètre de défaut d’étanchéité : le débit d’infiltration

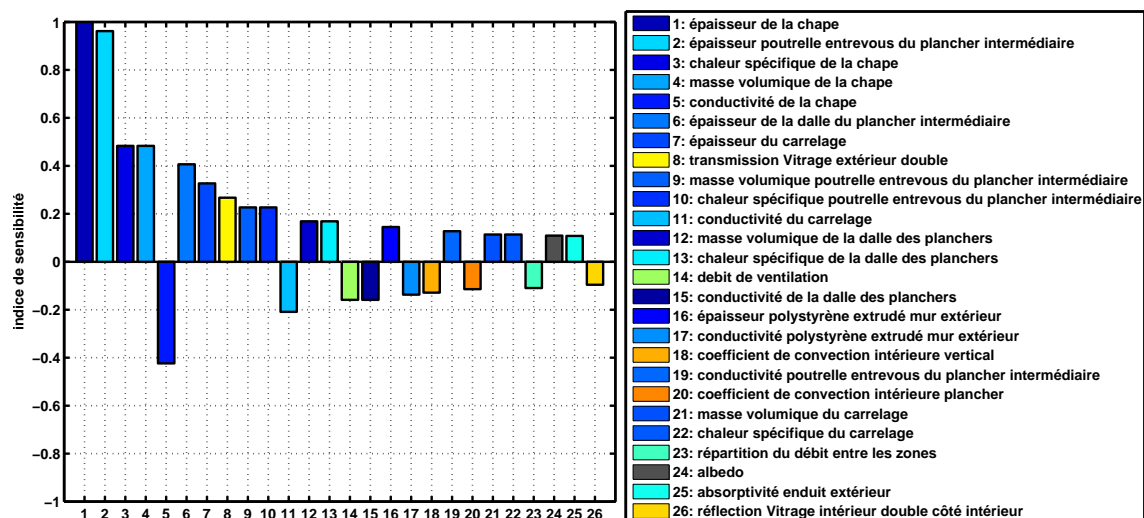
**Maison I-BB : figures 4.9** Pour le besoin de chauffage de la maison I-BB, les familles des paramètres les plus influents sont :

- les paramètres relatifs au système énergétique
  - la répartition du débit entre les zones
  - l’efficacité de l’échangeur
- les paramètres relatifs à l’isolation du bâtiment
  - l’épaisseur du polystyrène extrudé
  - la conductivité du polystyrène extrudé
- les paramètres relatifs à l’inertie du bâtiment
  - caractéristiques physiques de la chape
  - épaisseur des poutrelles entrevous du plancher intermédiaire
  - dalle du plancher intermédiaire
- les paramètres influents relatifs aux caractéristiques physiques des vitrages
  - la transmission du vitrage extérieur
  - la réflexion du vitrage intérieur

**Maison RT2005 : figures 4.10** Pour le besoin de chauffage de la maison RT2005, les familles des paramètres les plus influents sont :

- le paramètre relatif au système énergétique : le débit de ventilation
- les paramètres relatifs à l’isolation du bâtiment
  - l’épaisseur de la laine de verre
  - la conductivité de la laine de verre
  - l’épaisseur du polystyrène extrudé
  - la conductivité du polystyrène extrudé
- les paramètres influents relatifs aux caractéristiques physiques des vitrages
  - la transmission du vitrage extérieur
  - la réflexion du vitrage intérieur
- le paramètre de défaut d’étanchéité : le débit d’infiltration
- le paramètre de convection intérieur vertical
- la réflexion du sol : albedo

## 4.2 Cas 1 : Incertitude sur les besoins en chauffage et le confort dans trois bâtiments



**Figure 4.11** – Résultat de l’analyse de sensibilité locale pour le confort d’été pour le rez de chaussé pour la maison I-DM

Pour les maisons I-DM et I-BB, les écarts entre les valeurs des indices de sensibilité sont faibles entre tous les paramètres. Pour les paramètres influents, il y a peu de différence entre ces deux bâtiments mis à part l’influence des isolants qui est de la laine de verre pour la I-DM et du polystyrène extrudé pour la I-BB. Pour le cas de la maison RT2005, 5 paramètres ont des valeurs d’indice de sensibilité élevés et le débit de ventilation est le paramètre le plus influent dans le cas cette maison.

En conclusion les paramètres les plus influents pour le besoin de chauffage quelle que soit la maison sont ceux relatifs au renouvellement d’air. Pour les maisons à faible consommation d’énergie telles I-DM et I-BB, les paramètres les plus influents sont l’efficacité de l’échangeur et la répartition du débit entre les niveaux. Si l’efficacité de l’échangeur augmente, le besoin de chauffage diminue et si le débit de ventilation augmente au RDC, la température de consigne est atteinte rapidement et le besoin de chauffage diminue, car la régulation de la température de consigne du chauffage est au RDC. Pour la maison respectant la RT 2005, le paramètre le plus influent est le débit de ventilation or ce paramètre ne fait pas partie des 15 paramètres les plus influents dans le cas des maisons I-DM et I-BB. Pour la maison RT 2005, aucun système énergétique ne permet de réchauffer l’air extérieur pénétrant dans le bâtiment et plus le débit est élevé plus le besoin de chauffage est élevé.

**Étude sur le confort d’été :** Les figures 4.11, 4.12 et 4.13 présentent les résultats des paramètres influents pour le confort d’été représenté par les degrés heures d’inconfort pour les trois bâtiments.

**Maison I-DM : figures 4.11** Pour le confort d’été de la maison I-DM, les familles des paramètres les plus influents sont :

- les paramètres relatifs à l’inertie du bâtiment

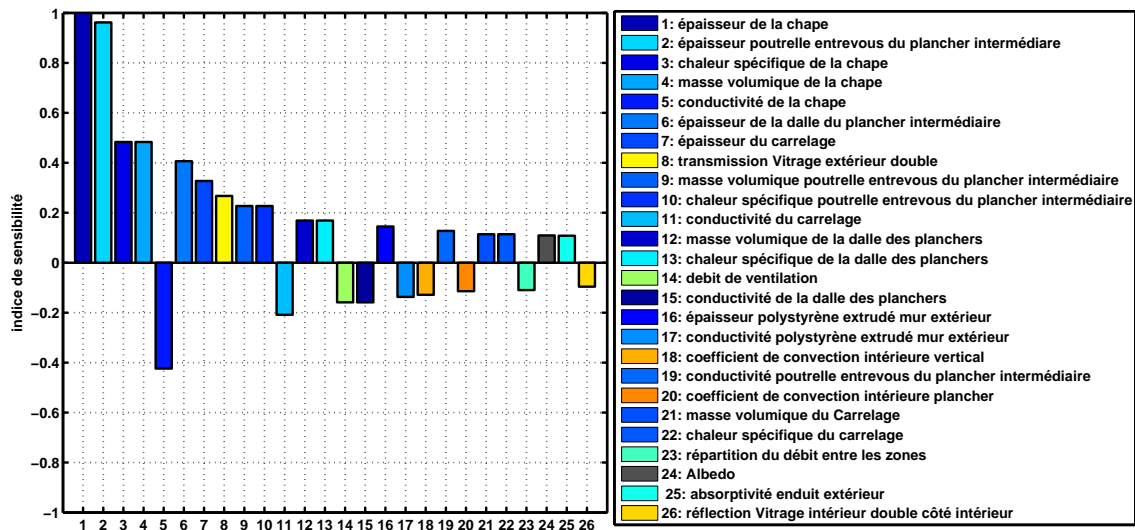


Figure 4.12 – Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour le confort d'été pour le rez de chaussé pour la maison I-BB

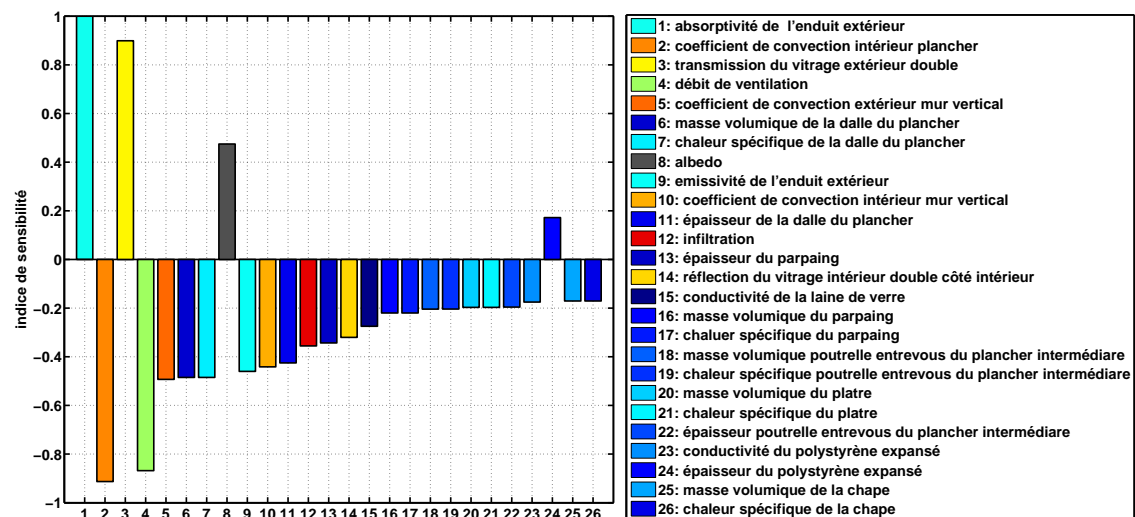


Figure 4.13 – Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour le confort d'été pour le rez de chaussé pour la maison RT2005

## 4.2 Cas 1 : Incertitude sur les besoins en chauffage et le confort dans trois bâtiments

---

- caractéristiques physiques de la chape
- caractéristiques physiques des poutrelles entrevous du plancher intermédiaire
- dalle du plancher intermédiaire
- le paramètre influent relatif aux caractéristiques physiques des vitrages : la transmission du vitrage extérieur

**Maison I-BB : figures 4.12** Pour le confort d'été de la maison I-BB, les familles des paramètres les plus influents sont :

- les paramètres relatifs à l'inertie du bâtiment
  - caractéristiques physiques de la chape
  - caractéristiques physiques des poutrelles entrevous du plancher intermédiaire
  - dalle du plancher intermédiaire
- le paramètre influent relatif aux caractéristiques physiques des vitrages : la transmission du vitrage extérieur

**Maison RT2005 : figures 4.13** Pour le confort d'été de la maison RT2005, les familles des paramètres les plus influents sont :

- le paramètre de l'absorptivité de l'enduit extérieur
- les paramètres de convection
- le paramètre influent relatif aux caractéristiques physiques des vitrages : la transmission du vitrage extérieur
- le paramètre relatif au système énergétique : le débit de ventilation
  - coefficient de convection intérieur plancher
  - coefficient de convection extérieur mur vertical
  - coefficient de convection intérieur mur vertical
- les paramètres relatifs à l'inertie du bâtiment avec la masse volumique et la chaleur spécifique des planchers
- les paramètres relatifs à l'inertie du bâtiment avec les caractéristiques physiques de la dalle du plancher
- la réflexion du sol : albedo

Pour le confort d'été les paramètres les plus influents sont ceux relatifs à l'inertie du bâtiment pour le cas des maisons I-DM et I-BB. Tout comme pour le besoin de chauffage, il y a très peu de différence entre les paramètres influents de ces deux bâtiments. Pour la maison RT 2005, les paramètres influents pour le confort d'été sont très différents par rapport aux maisons I-DM et I-BB. Pour le confort d'été les paramètres les plus influents sont l'absorptivité de l'enduit extérieur, les coefficients de convection, la transmission du vitrage extérieur, le débit de ventilation et les paramètres relatifs à l'inertie qui sont la masse volumique et la chaleur spécifique des planchers.

L'analyse de sensibilité locale a permis de déterminer les paramètres les plus influents pour le cas des trois maisons I-DM, I-BB et RT 2005 qui diffèrent entre leurs modes constructifs et leurs performances énergétiques. Entre les deux sorties étudiées, le besoin de chauffage et le confort d'été, les paramètres influents par maison sont différents. Pour le cas des maisons I-DM et I-BB dont les performances énergétiques

sont proches malgré des modes constructifs différents, les paramètres influents sont identiques et font partie des mêmes catégories de construction dans le cas du besoin de chauffage et du confort d'été. Dans le cas de la maison RT2005, des différences sont observées par rapport aux maisons I-DM et I-BB.

Cette analyse permet de sélectionner les paramètres influents et donc de limiter le nombre de paramètres considérés. Dans la suite de l'étude, l'analyse de sensibilité globale sera utilisée. La sélection d'un nombre restreint de paramètres permet d'effectuer l'analyse de sensibilité globale en ayant des temps de calcul raisonnables (2 à 3 jours). Avant l'étape de l'analyse de sensibilité globale, on s'est intéressé à sélectionner les paramètres les plus influents et à propager leurs incertitudes dans le cas du besoin de chauffage. Le confort d'été n'a pas été pris en compte dans la suite pour ne pas surcharger l'étude.

### 4.2.3 Quantification et propagation des incertitudes

#### 4.2.3.1 Analyse d'incertitude

Le résultat de l'analyse de sensibilité locale permet de sélectionner les paramètres les plus influents pour les sorties du modèle numérique. Une plage d'incertitude et une distribution sont définies en fonction de chaque paramètre. Si le paramètre reflète un manque de connaissance de la valeur mesurée, une distribution normale est alors choisie. Si on a une méconnaissance de la valeur exacte du paramètre, une distribution uniforme selon Monte Carlo (I. Macdonald (2001) [36]) est alors choisie.

Le choix de la plage d'incertitude est plus complexe et peu d'information existent dans la littérature. Pour certains paramètres l'incertitude est définie et connue, c'est le cas de la conductivité des matériaux car les mesures effectuées par le CSTB<sup>1</sup> ont une incertitude de 5% et cette valeur sera considérée pour toutes les conductivités. Les caractéristiques des vitrages sont connues avec une incertitude de mesure de 3%. Les épaisseurs des matériaux ont des incertitudes élevées sur leur fabrication à part pour le polystyrène extrudé dont la précision de la fabrication est fiable à 3%. La laine de verre est un matériau souple, une incertitude de 10% a été considérée et pour les épaisseurs des matériaux composant la structure, 10% d'incertitude a été considérée car ces matériaux sont conçus sur le chantier et leur fabrication est soumise à de nombreuses incertitudes.

Concernant les paramètres des débits de ventilation et d'infiltration, une incertitude de 10% a été considérée due à la mesure de ces paramètres. Pour la répartition du débit entre le RDC et l'étage, une plage de 20% d'incertitude a été considérée, cette plage est plus élevée que le débit de ventilation car on a une grande méconnaissance sur la valeur exacte de la répartition du débit. Pour les épaisseurs des carrelages, leur fabrication est effectuée en usine, il y a moins d'erreur de conception, l'incertitude considérée est de 5%. Pour l'albédo, une incertitude de 10% a été considérée due à l'incertitude de sa mesure. Pour le coefficient de convection une incertitude de 10%

---

1. CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment



## 4.2 Cas 1 : Incertitude sur les besoins en chauffage et le confort dans trois bâtiments

n°	Paramètres	Valeur	Distribution	Incertitude
1	répartition du débit de ventilation	0,45	uniforme	+/- 20%
2	efficacité échangeur	0,90	uniforme	+/- 10%
3	conductivité laine de verre	0,035 W/m.K	normale	+/- 5%
4	épaisseur laine de verre	0,2 m	normale	+/- 10%
5	épaisseur de la chape	0,08 m	normale	+/- 10%
6	épaisseur poutrelle entrevous du plancher intermédiaire	0,16 m	normale	+/- 10%
7	transmission vitrage extérieur	0,842	normale	+/- 5%
8	chaleur spécifique de la chape	880 J/(kg.K)	normale	+/- 10%
9	débit d'infiltration	0,115V/h	uniforme	+/- 10%
10	conductivité de la chape	2,75 W/m.K	normale	+/- 5%
11	épaisseur de la dalle	0,04 m	normale	+/- 10%
12	réflexion vitrage intérieur	0,312	normale	+/- 5%
13	débit de ventilation	135 m <sup>3</sup> /h	uniforme	+/- 10%

**Table 4.3** – Tableau des paramètres et plage de variation pour la maison I-DM

a été considérée due à la méconnaissance de sa valeur exacte. Pour l'efficacité de l'échangeur, une plage d'incertitude s'étendant entre 0,81 et 0,95 a été considérée, cela représente une plage d'incertitude de -10% et de +5%. On a estimé qu'une valeur d'efficacité supérieure à 0,95 n'était pas possible. La borne inférieure de 0,81 a été choisie pour prendre en compte les incertitudes sur la mesure de ce paramètre.

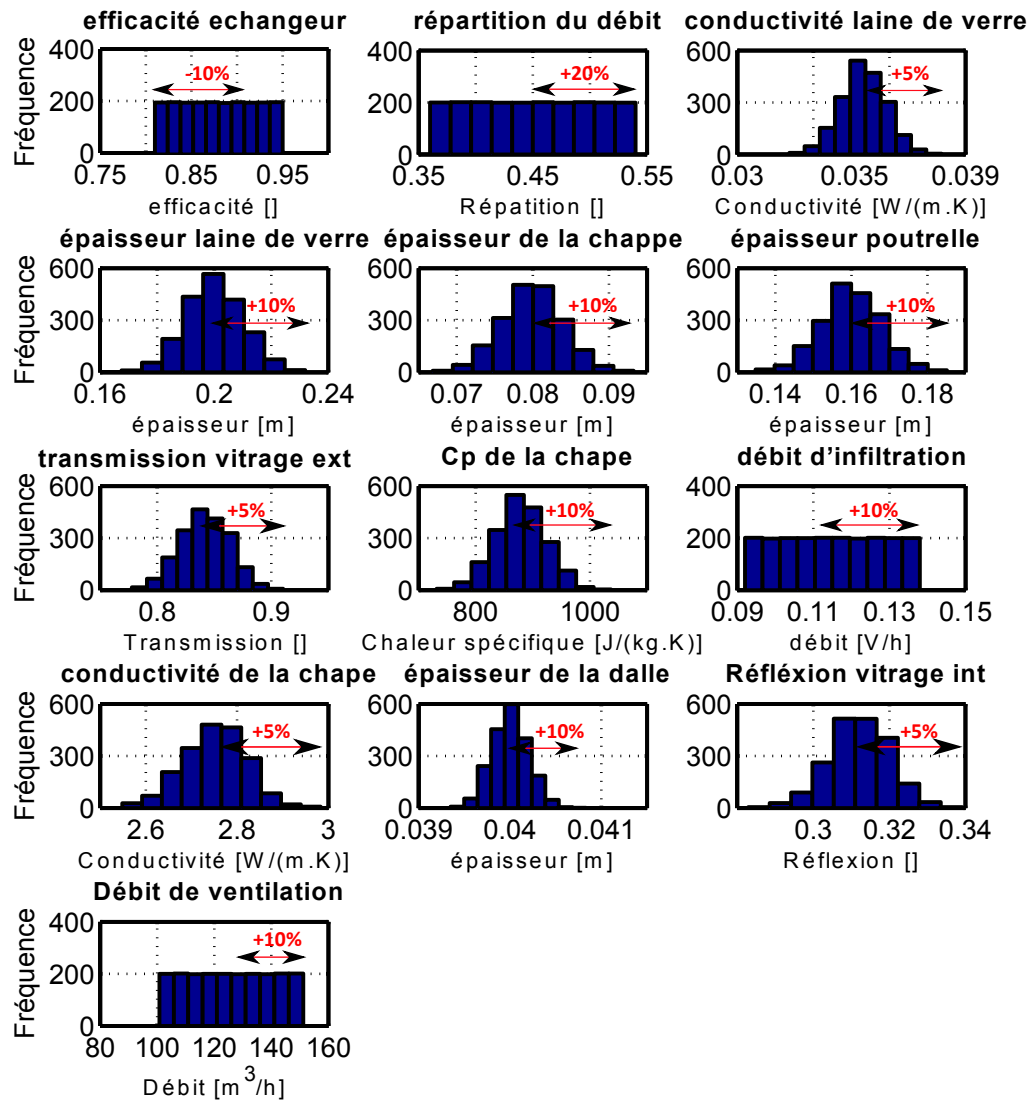
Pour chaque maison 2000 simulations ont été effectuées.

### 4.2.3.2 Paramètres considérés et leurs plages d'incertitudes

**Maison I-DM** Nous avons sélectionné 13 paramètres influents trouvés à l'aide de l'analyse de sensibilité locale. Les paramètres avec leurs incertitudes sont représentés dans le tableau 4.3. Nous avons sélectionné les 13 premiers paramètres mais pour réduire ce nombre, nous avons décidé de ne pas considérer la masse volumique de la chape car l'épaisseur, la conductivité et la chaleur spécifique de la chape sont déjà pris en compte. Nous avons décidé de considérer le débit de ventilation bien qu'il soit en 23<sup>ème</sup> position. Plusieurs études ont montré que ce paramètre était influent. La figure 4.14 montre les échantillonnages des paramètres.

**Maison I-BB** Comme pour la I-DM, 13 paramètres influents trouvés à l'aide de l'analyse de sensibilité locale ont été sélectionnés. Les 13 premiers paramètres ont été sélectionnés et comme pour la I-DM, nous n'avons pas considéré la masse volumique de la chape. Le 13<sup>ème</sup> paramètre considéré est le débit de ventilation. Ce paramètre





**Figure 4.14** – Incertitude et échantillonnage des paramètres influents pour la maison I-DM

## 4.2 Cas 1 : Incertitude sur les besoins en chauffage et le confort dans trois bâtiments

---

n°	Paramètres	Valeur	distribution	incertitude
1	efficacité échangeur	0.90	uniforme	+/- 10%
2	répartition du débit de ventilation	0.45	uniforme	+/- 20%
3	épaisseur de la chape	0.08 m	normale	+/- 10%
4	épaisseur poutrelle entrevous du plancher intermédiaire	0.16 m	normale	+/- 10%
5	transmission vitrage extérieur	0.842	normale	+/- 5%
6	conductivité polystyrène extrudé du mur extérieur	0.03 W/m.K	normale	+/- 5%
7	épaisseur polystyrène extrudé du mur extérieur	0.2 m	normale	+/- 3%
8	chaleur spécifique de la chape	880 J/(kg.K)	normale	+/- 10%
9	conductivité de la chape	2.75 W/m.K	normale	+/- 5%
10	épaisseur de la dalle	0.04 m	normale	+/- 10%
11	épaisseur du carrelage	0.01 m	normale	+/- 5%
12	réflexion vitrage extérieur	0.312	normale	+/- 5%
13	débit de ventilation	135 m <sup>3</sup> /h	uniforme	+/- 10%

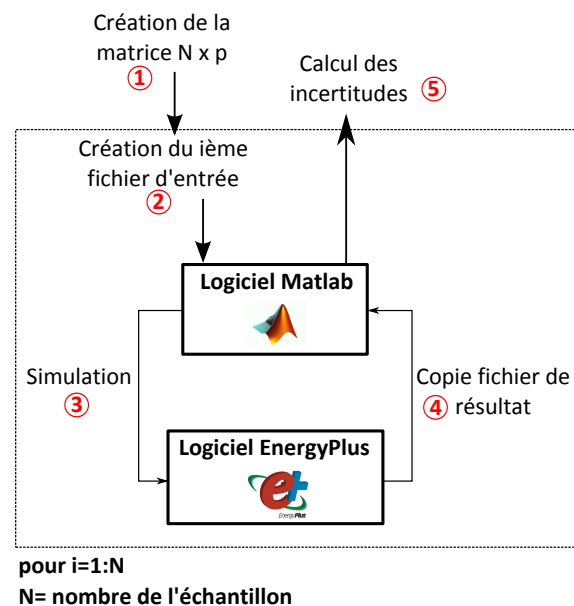
**Table 4.4** – Tableau des paramètres et plage de variation pour la maison I-BB

est en 28<sup>ème</sup> position mais nous avons préféré le considérer dans la suite des travaux comme pour la I-DM. Les paramètres avec leurs incertitudes sont représentés dans le tableau 4.4.

**Maison RT 2005** Les treize premiers paramètres déterminés à l'aide de l'analyse de sensibilité locale ont été considérés. Les paramètres avec leurs incertitudes sont représentés dans le tableau 4.5.

n°	Paramètres	Valeur	distribution	incertitude
1	débit de ventilation	0,6V/h	uniforme	+/- 10%
2	conductivité laine de verre	0.039 W/m.K	normale	+/- 5%
3	épaisseur laine de verre	0.08 m	normale	+/- 10%
4	transmission vitrage extérieur	0.842	normale	+/- 5%
5	débit d'infiltration	0.22V/h	uniforme	+/- 10%
6	réflexion vitrage extérieur	0.312	normale	+/- 5%
7	conductivité polystyrène expansé	0.035 W/m.K	normale	+/- 5%
8	épaisseur polystyrène expansé	0.1 m	normale	+/- 3%
9	conductivité laine de verre des combles	0.039 W/m.K	normale	+/- 5%
10	épaisseur laine de verre des combles	0.12 m	normale	+/- 10%
11	coefficient de convection intérieure verticale	3,08 W/(m <sup>2</sup> .K)	uniforme	+/- 10%
12	absorptivité enduit extérieur	0.5	normale	+/- 10%
13	albédo	0.35	normale	+/- 10%

**Table 4.5** – Tableau des paramètres et plage de variation pour la maison RT 2005



**Figure 4.15** – Étape pour obtenir les résultats de l'analyse d'incertitude

#### 4.2.3.3 Mise en place des séries de simulations

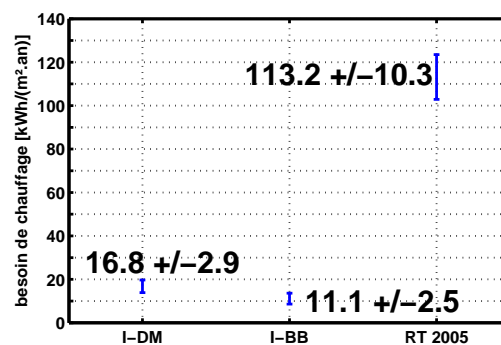
Comme pour l'analyse de sensibilité locale, l'analyse d'incertitude effectue les simulations en série grâce au couplage entre Matlab et EnergyPlus. Cinq étapes sont nécessaires pour obtenir le résultat de l'analyse d'incertitude. La figure 4.15 présente le couplage et les 5 étapes nécessaires :

1. Création de la matrice  $N \times p$  ( $N$  = lignes et  $p$  = colonnes) : chaque colonne de la matrice correspond à l'échantillonnage de chaque paramètre en fonction de son incertitude et  $N$  est égal au nombre de simulations prises en compte dans l'analyse d'incertitude.
2. Création du fichier d'entrée : pour chaque ligne de la matrice  $N \times p$  un fichier EnergyPlus est créé.
3. Simulation : EnergyPlus effectue la simulation en considérant le fichier idf créé à l'étape 2.
4. Récupération des résultats : EnergyPlus crée un fichier csv de résultat, à cette étape on stocke les résultats.  
Ces quatre premières étapes sont répétées en fonction du nombre de simulations considéré dans l'analyse d'incertitude. Les simulations peuvent être effectuées en parallèle.
5. Calcul de l'incertitude : à l'aide de Matlab on extrait les résultats pour chaque simulation et on calcule la plage d'incertitude.

#### 4.2.3.4 Résultats des analyses d'incertitudes

La figure 4.16 représente les résultats pour l'analyse d'incertitude en considérant 2000 simulations. La moyenne du besoin de chauffage et les incertitudes des 3 maisons considérées, I-DM, I-BB et RT 2005 sont représentées. La moyenne du besoin de

	Maison I-DM [kWh/(m <sup>2</sup> .an)]	Maison I-BB [kWh/(m <sup>2</sup> .an)]	Maison RT 2005 [kWh/(m <sup>2</sup> .an)]
Moyenne du besoin de chauffage	16,8	11,1	113,2
Incertitude valeur absolu (2 fois l'écart type)	±2,9	±2.5	±10.3
Incertitude valeur relative [%]	18%	23%	9%



**Figure 4.16** – Résultats des moyennes du besoin de chauffage et des incertitudes pour 2000 simulations pour les 3 maisons étudiées

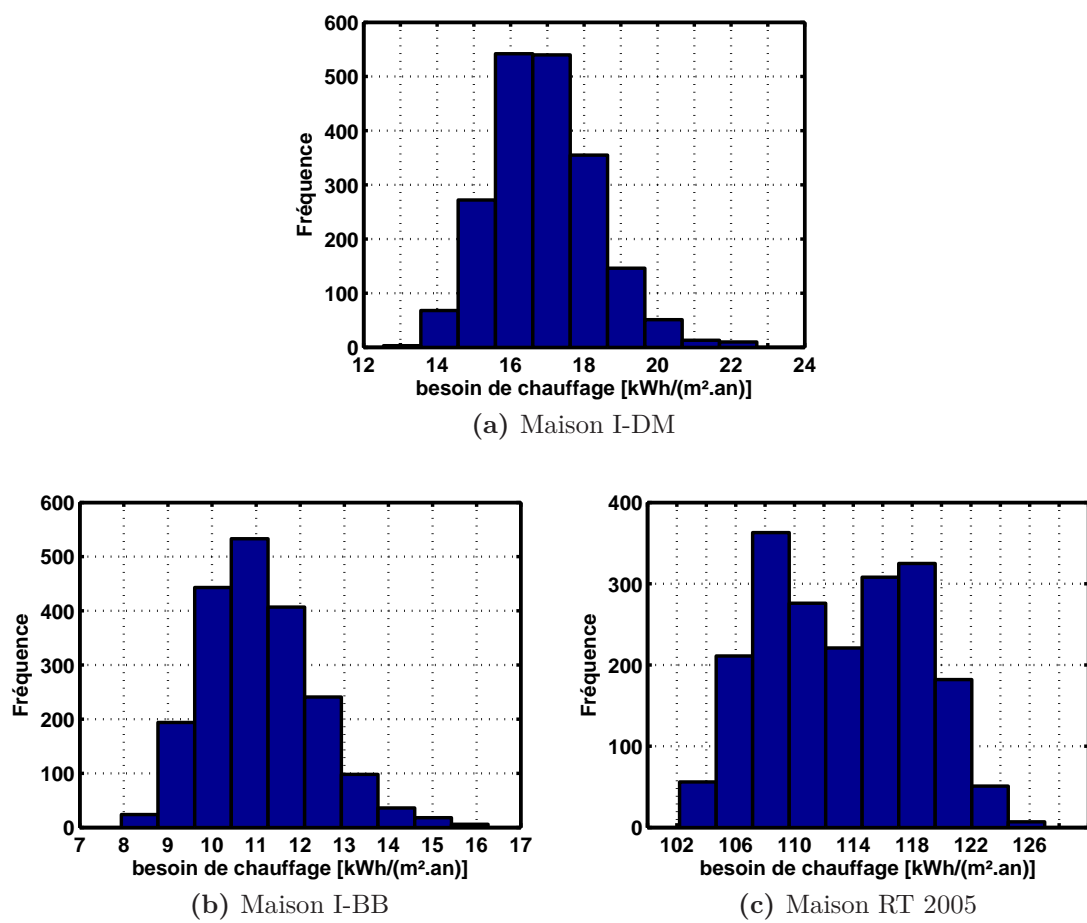
chauffage de la I-DM est de 16,8kWh/(m<sup>2</sup>.an), son incertitude relative est d'environ 18%, pour la I-BB la moyenne du besoin de chauffage est égale à 11,1kWh/(m<sup>2</sup>.an) et son incertitude relative est environ égale à 23%, pour la RT 2005 la moyenne du besoin de chauffage est égale à 113,2kWh/(m<sup>2</sup>.an) et son incertitude relative est environ égale à 9%. L'augmentation du besoin de chauffage entraîne donc une diminution de l'incertitude relative et une augmentation de la valeur absolue d'incertitude.

La figure 4.17 représente l'histogramme du besoin de chauffage des 2000 simulations pour les trois maisons. Pour la I-DM et la I-BB, la distribution des besoins de chauffage est sous forme gaussienne, tandis que pour la maison RT 2005, la distribution est plus hétérogène.

L'analyse d'incertitude a permis de définir des plages d'incertitude pour les résultats des besoins de chauffage en fonction de l'incertitude de 13 paramètres considérés comme influents. Mais cette étude ne permet pas de connaître l'effet de la valeur de l'incertitude d'un paramètre sur la sortie du modèle.

## 4.2 Cas 1 : Incertitude sur les besoins en chauffage et le confort dans trois bâtiments

---



**Figure 4.17** – Histogramme des besoins de chauffage pour les trois maisons pour 2000 simulations

## 4.2.4 Paramètres influents et plages de variation

### 4.2.4.1 Analyse de sensibilité globale

Les analyses de sensibilité globale consistent à quantifier l'influence des paramètres sur toute leur plage de variation et permettent de connaître l'effet d'un paramètre sur la sortie du modèle en fonction de son incertitude. Elles prennent en compte la distribution associée aux paramètres et permettent la variation de tous les paramètres à la fois. On va calculer deux indices de sensibilité : l'indice du premier ordre et l'indice total. L'indice du premier ordre  $S_i$  renseigne sur l'influence du paramètre sur la sortie du modèle sur sa plage d'incertitude. La somme des indices du premier ordre est environ égale à 1. L'indice total  $S_{Ti}$  renseigne sur la sensibilité du paramètre seul et la sensibilité aux interactions de ce paramètre avec d'autres paramètres. Plus l'indice de sensibilité est élevé plus son influence est importante.

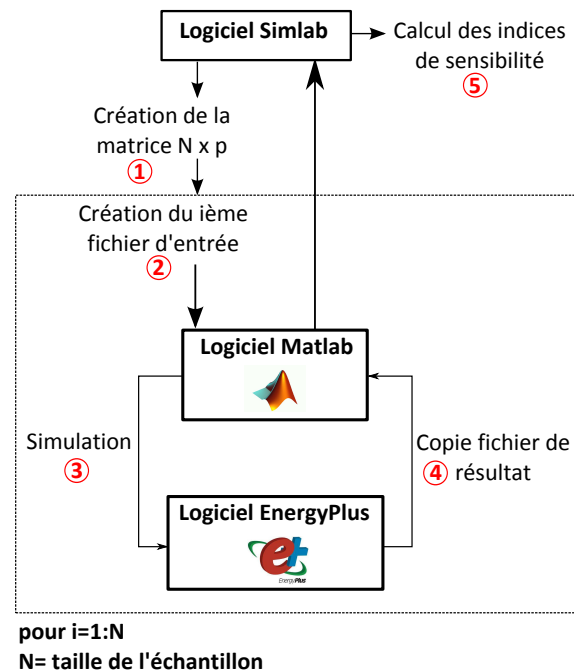
Cette méthode est coûteuse en temps de calcul, plus il y a de paramètres plus le nombre de simulations doit être élevé pour obtenir un résultat fiable. Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode FAST présentée en partie 1.4.1.4. Pour chaque maison, 13 paramètres ont été sélectionnés. Par maison 6669 simulations ont été effectuées, cela correspond à un jeu de 513 ( $6669 = 513 \cdot 13$ ) simulations par paramètres. T.A. Mara et al (2008) [42] a évalué les incertitudes des résultats des analyses de sensibilité globale en fonction du nombre de simulations. Un échantillonnage de 513 paramètres est un bon compromis entre réduction de l'incertitude et temps de simulation. Il faudrait augmenter le nombre de simulations pour réduire l'erreur sur les résultats des indices de sensibilité globale. Dans notre cas, le temps de simulation est d'environ 2 minutes par simulation et au total 2 jours sont nécessaires pour obtenir le résultat des simulations et il faut 5 minutes pour le traitement et l'obtention des résultats des indices de sensibilité.

Comme pour l'analyse d'incertitude, les résultats de l'analyse de sensibilité locale permettent de sélectionner les paramètres les plus influents pour les sorties du modèle numérique. La plage d'incertitude des paramètres définie dans la partie 4.2.3.2 est utilisée.

### 4.2.4.2 Mise en place des séries de simulations

Comme pour l'analyse de sensibilité locale et l'analyse d'incertitude, l'analyse de sensibilité globale effectue les simulations grâce au couplage entre Matlab et EnergyPlus. De plus pour générer les matrices d'échantillonnage et calculer les indices du premier ordre et total, l'outil Simlab [1] a été utilisé en couplage avec Matlab. Cinq étapes sont nécessaires pour obtenir le résultat de l'analyse de sensibilité globale. La figure 4.18 présente le couplage et les 5 étapes nécessaires :

1. Création de la matrice  $N \times p$  ( $N$  = lignes et  $p$  = colonnes) : cette matrice est générée grâce à l'outil Simlab et tient compte de la plage d'incertitude de chaque paramètre.
2. Création du fichier d'entrée : pour chaque ligne de la matrice  $N \times p$  un fichier EnergyPlus est créé.



**Figure 4.18** – Étape pour obtenir les résultats de l’analyse de sensibilité globale

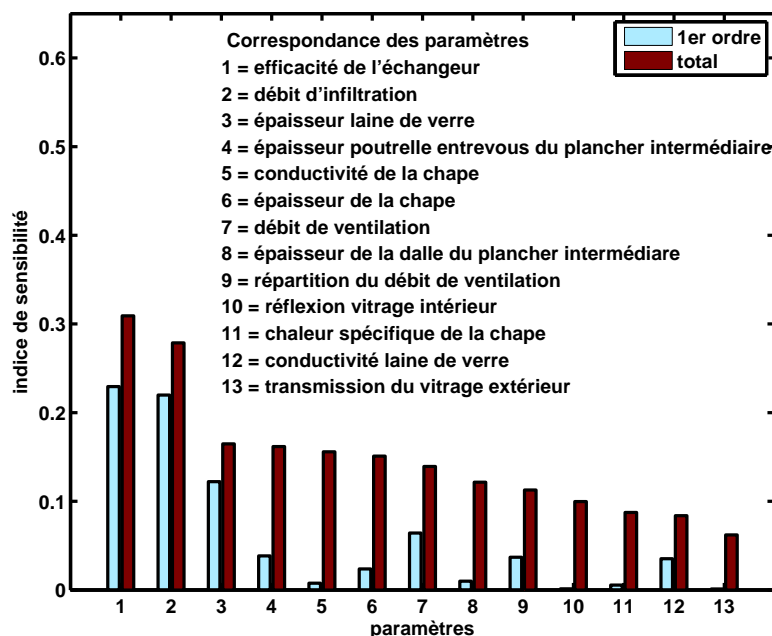
3. Simulation : EnergyPlus effectue la simulation en considérant le fichier idf créé à l’étape 2.
4. Récupération des résultats : EnergyPlus crée un fichier csv de résultat, à cette étape on stocke les résultats.  
Ces quatre premières étapes sont répétées en fonction du nombre de simulation considéré dans l’analyse de sensibilité globale. Les simulations peuvent être effectuées en parallèle.
5. Calcul des indices de sensibilité : à l’aide de Matlab on extrait les résultats pour chaque simulation et à l’aide de Simlab on calcule les indices de sensibilité.

#### 4.2.4.3 Résultats

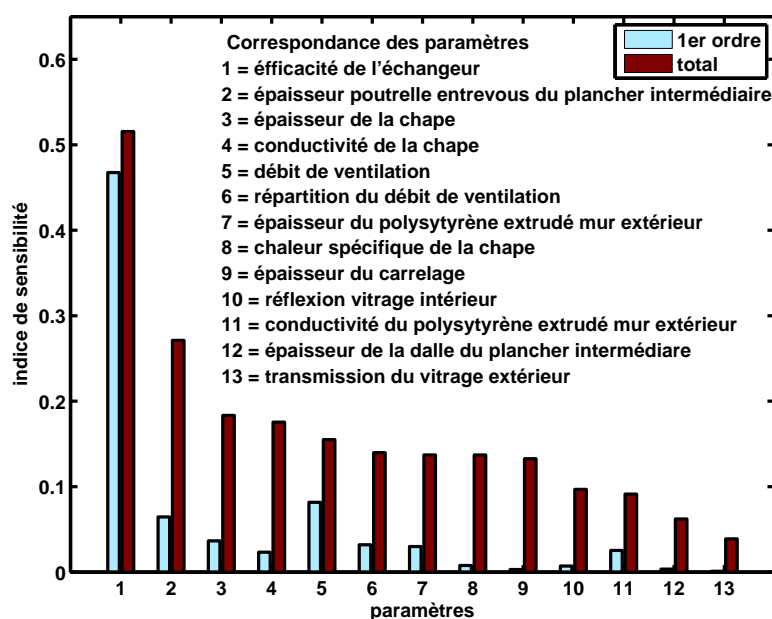
Les figures 4.19, 4.20 et 4.21 montrent les résultats des indices de sensibilité globale du premier ordre et total respectivement pour les maisons I-DM, I-BB et RT 2005 pour le besoin de chauffage. Les indices de sensibilité sont triés par ordre d’importance par rapport à l’indice total. Pour les 13 paramètres sélectionnés par maison, ceux ayant les indices les plus élevés sont les paramètres ayant le plus d’influence dans leur plage de variation pour le besoin de chauffage.

**Maison I-DM : figure 4.19** Les paramètres ayant les indices les plus élevés sont l’efficacité de l’échangeur et le débit d’infiltration. On peut remarquer que l’épaisseur de la laine de verre a un indice du premier ordre supérieur au paramètre de la conductivité de la laine de verre. Cela s’explique par la valeur de l’incertitude de l’épaisseur de la laine de verre qui est égale 10%, elle est supérieure à l’incertitude de la conductivité qui est de 5%. Les indices de sensibilité totaux sont largement

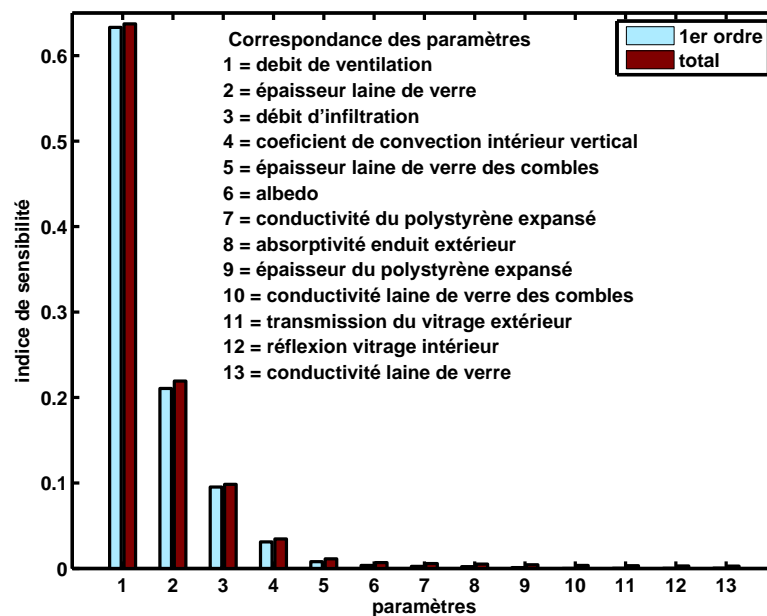




**Figure 4.19** – Résultat de l'analyse de sensibilité globale pour le besoin de chauffage pour la maison I-DM



**Figure 4.20** – Résultat de l'analyse de sensibilité globale pour le besoin de chauffage pour la maison I-BB



**Figure 4.21** – Résultat de l’analyse de sensibilité globale pour le besoin de chauffage pour la maison RT 2005

supérieurs aux indices du premier ordre et il y a donc de nombreuses interactions entre les 13 paramètres.

**Maison I-BB : figure 4.20** Comme pour la I-DM, Le paramètre le plus influent est l’efficacité de l’échangeur, son indice total est égal à 0,52. Le paramètre suivant est l’épaisseur de la poutrelle entrevous du plancher intermédiaire avec un indice total égal à 0,28.

**Maison RT 2005 : figure 4.21** Pour cette maison, les indices du premier ordre sont à peine inférieurs aux indices totaux et 4 paramètres sont influents dans le cas de la maison RT 2005, le débit de ventilation, l’épaisseur de la laine de verre, le débit d’infiltration et le coefficient de convection intérieur vertical. Les 9 autres paramètres ont des indices de sensibilité quasi nuls.

#### 4.2.4.4 Analyse des résultats

On peut remarquer que pour les trois bâtiments étudiés, les paramètres ayant les indices de sensibilité globaux les plus élevés sont des paramètres se rapportant aux systèmes énergétiques comme pour les résultats de l’analyse de sensibilité locale. Une différence entre les bâtiments performants et la maison RT2005 est la répartition des indices de sensibilité. Pour le cas de la maison RT2005, pour réduire l’incertitude sur le besoin de chauffage trois paramètres sont prépondérants tandis que pour les maisons I-DM et I-BB environ 10 paramètres ont leurs indices de sensibilité globaux supérieurs à 0,1. Ce qui montre que dans le cas d’un bâtiment performant, de nom-

breux paramètres sont responsables d'une petite part de l'incertitude sur le résultat.

Pour les deux maisons, I-DM et I-BB, c'est l'efficacité de l'échangeur qui est responsable de la plus grande part d'incertitude sur le résultat. Pour le cas de la I-DM, l'isolant des parois verticales est la laine de verre qui est un matériau souple avec une grande incertitude sur la valeur exacte de son épaisseur, une incertitude élevée égale à 10% et un indice du premier ordre égal à 0,14. Or pour la I-BB, l'isolant des parois verticales est du polystyrène extrudé qui est un matériau rigide, l'incertitude sur la valeur de son épaisseur est faible égale à 3% et son indice de sensibilité du premier ordre est égal à 0,03. Les épaisseurs des isolants sont des paramètres influents et plus leurs incertitudes sont élevées, plus l'effet sur le besoin de chauffage est grand. L'utilisation de matériaux dont la connaissance est meilleure permet donc de réduire l'incertitude sur le besoin de chauffage.

Dans le cas des maisons I-DM et I-BB, les indices de sensibilité totaux sont très supérieurs à ceux du premier ordre, tandis que pour la maison RT 2005, ils sont presque équivalents, ce qui prouve que dans le cas des maisons I-DM et I-BB, il y a plus d'interaction du fait de la présence des modèles de systèmes énergétiques. Dans le cas de la maison RT 2005, le modèle est très simplifié avec un chauffage idéal et une ventilation simple flux alors que pour les maisons I-DM et I-BB, le modèle du système énergétique est complexe avec un échangeur, une résistance électrique, un débit réparti entre les niveaux et un transfert d'air entre les deux zones.

Dans le cas du besoin de chauffage pour les simulations des maisons I-DM, I-BB et RT 2005, l'analyse de sensibilité locale a permis de sélectionner un nombre réduit de paramètres influents. L'analyse de sensibilité locale utilise la méthode de perturbation d'une faible valeur, dans notre cas 1%, d'un paramètre à la fois. Le classement des paramètres influents à l'aide de l'analyse de sensibilité locale ne tient pas compte de l'incertitude sur les paramètres comme c'est le cas pour l'analyse de sensibilité globale. Certains paramètres peuvent se révéler influents dans le cas d'analyse de sensibilité globale et non dans le cas de l'analyse de sensibilité locale.

On a pu remarquer que sur les 13 paramètres sélectionnés par l'analyse de sensibilité locale certains paramètres sont peu influents dans leur plage de variation. Dans le cas des maisons I-DM et I-BB, le paramètre du débit de ventilation ne faisait pas partie des 15 premiers paramètres influents des résultats de l'analyse de sensibilité locales. On a voulu en tenir compte pour l'analyse de sensibilité globale, il s'est avéré que le résultat de son indice total est supérieur à 0,1. Dans le cas de la maison I-DM, le paramètre du débit d'infiltration est influent or pour la I-BB, ce paramètre ne figurait pas parmi les 13 premiers paramètres influents déterminés à l'aide de l'analyse de sensibilité locale.

**Seconde étude pour la maison I-BB** On va s'intéresser maintenant à effectuer une seconde analyse de sensibilité globale pour le cas de la maison I-BB en considérant le paramètre du débit d'infiltration. Dans le cas de la maison I-DM ce paramètre est un des plus influents mais il n'avait pas été révélé influent par l'analyse de sen-

sibilité locale pour le cas de la maison I-BB. Cette étude va permettre d'étudier l'influence d'un paramètre dans sa plage de variation alors que dans le cas d'une faible perturbation son influence était faible.

Les paramètres dont la valeur d'indice de sensibilité du premier ordre étaient faibles lors de la première étude n'ont pas été pris en compte. Neuf paramètres ont été pris en compte pour cette seconde étude :

1. efficacité de l'échangeur
2. répartition du débit de ventilation
3. épaisseur de la chape
4. épaisseur poutrelle entrevous du plancher intermédiaire
5. épaisseur du polystyrène extrudé mur extérieur
6. conductivité du polystyrène extrudé mur extérieur
7. conductivité de la chape
8. débit de ventilation
9. débit d'infiltration

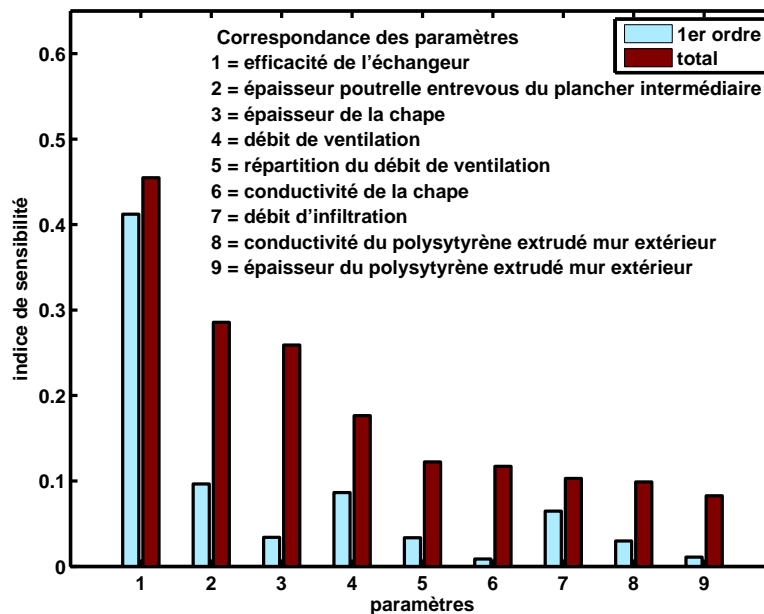
La figure 4.22 représente les indices de sensibilité globale pour le besoin de chauffage pour la maison I-BB en considérant 9 paramètres influents sur 6633 simulations. Le paramètre le plus influent reste l'efficacité de l'échangeur avec un indice de sensibilité total égal à 0,45. Le débit d'infiltration est en 7<sup>ème</sup> position, son indice de sensibilité total est de l'ordre de 0,1.

Le débit d'infiltration n'avait pas été considéré dans la première étude. Dans cette seconde étude, le résultat de l'indice de sensibilité total du débit d'infiltration est d'environ 0,1 comme de nombreux autres paramètres. Ces résultats ne remettent pas en question les résultats de l'analyse sensibilité locale mais confirment que de nombreux paramètres sont responsables de la faible part d'incertitude sur le besoin de chauffage.

### 4.2.5 Conclusion

Les analyses de sensibilité locale ont permis de sélectionner les paramètres les plus influents pour les trois bâtiments étudiés, les maisons I-DM, I-BB et RT 2005 dans le cas du besoin de chauffage et du confort d'été. Pour les maisons I-DM et I-BB, les indices de sensibilité réduits ont montré des similitudes pour les deux sorties étudiées et les paramètres les plus influents par sortie sont les mêmes entre les deux maisons. Le paramètre le plus influent pour le besoin est l'efficacité de l'échangeur de la ventilation double flux et pour le confort d'été c'est l'épaisseur de la chape. Dans le cas de la maison RT2005, les paramètres les plus influents sont pour le besoin de chauffage le débit de ventilation et pour le confort d'été l'absorptivité de l'enduit extérieur.

L'analyse de sensibilité locale a permis de sélectionner 13 paramètres influents par maison sur le résultat du besoin de chauffage. Une plage d'incertitude a été définie



**Figure 4.22** – Résultat de l'analyse de sensibilité globale pour le besoin de chauffage pour la maison I-BB en considérant neuf paramètres influents

par paramètre en fonction de la connaissance de la valeur exacte du paramètre, une distribution uniforme ou normale a été choisie. Puis une propagation des incertitudes a été réalisée, en considérant 2000 simulations afin de définir une plage d'incertitude pour le besoin de chauffage pour chaque maison. La moyenne du besoin de chauffage de la I-DM est de  $16,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{an})$ , son incertitude relative est d'environ 18% alors que pour la I-BB la moyenne du besoin de chauffage est égale à  $11,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{an})$  et son incertitude relative est environ égale à 23%. Pour la RT 2005 la moyenne du besoin de chauffage est égale à  $113,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{an})$  et son incertitude relative est environ égale à 9%. L'analyse d'incertitude a permis de considérer le besoin de chauffage dans une plage d'incertitude mais elle n'a pas permis de quantifier l'effet de l'incertitude du paramètre sur le résultat du besoin de chauffage.

L'analyse de sensibilité globale en appliquant la méthode FAST a été utilisée. Cette méthode est coûteuse en temps de calcul, elle permet d'identifier l'effet du paramètre sur la sortie du modèle en considérant l'incertitude du paramètre. Pour chaque maison, les paramètres les plus influents dans leur plage d'incertitude ont été déterminés. Certains paramètres comme la transmission du vitrage extérieur se sont révélés très peu voire non influents pour les trois maisons. D'autres comme le débit de ventilation se sont révélés influents dans tous les cas.

Une différence qui peut être remarquée entre les bâtiments performants et la maison RT2005 est le nombre de paramètres considérés comme influents. Pour l'analyse de sensibilité locale dans le cas de la RT2005, cinq paramètres ont des indices de sensibilité réduit supérieurs à 0,2 tandis que plus de 10 paramètres pour les maisons I-DM

et I-BB. Le même rapport est observé dans le cas de l'analyse de sensibilité globale pour l'indice total. Pour le cas de la maison RT2005, trois paramètres ont des indices totaux supérieurs à 0,2 tandis que plus de 10 paramètres pour les maisons I-DM et I-BB. On peut conclure que de nombreux paramètres sont responsables d'une faible part d'incertitude sur le besoin de chauffage dans le cas de bâtiments performants.

Cette étude a porté sur le résultat du besoin de chauffage de trois maisons I-DM, I-BB et RT 2005, on va maintenant s'intéresser aux résultats concernant la température d'air intérieur.

## 4.3 Cas 2 : Incertitudes associées aux températures d'air intérieur

Après avoir étudié les paramètres influents sur le besoin de chauffage pour trois maisons, nous nous sommes intéressés à la maison I-DM et au scénario réel. Nous avons déterminé les paramètres influents des températures d'air des zones du RDC et de l'étage à l'aide des analyses de sensibilité locale. Puis nous avons étudié les corrélations des paramètres pour définir des groupes de paramètres influents. Ensuite nous avons déterminé une plage d'incertitude pour les résultats de simulation de la température d'air du RDC et de l'étage qui permettra d'effectuer une comparaison entre la mesure et la simulation tout en tenant compte des différentes incertitudes. Puis une analyse de sensibilité globale a été effectuée pour déterminer quels sont les paramètres influents en considérant leur plage d'incertitude.

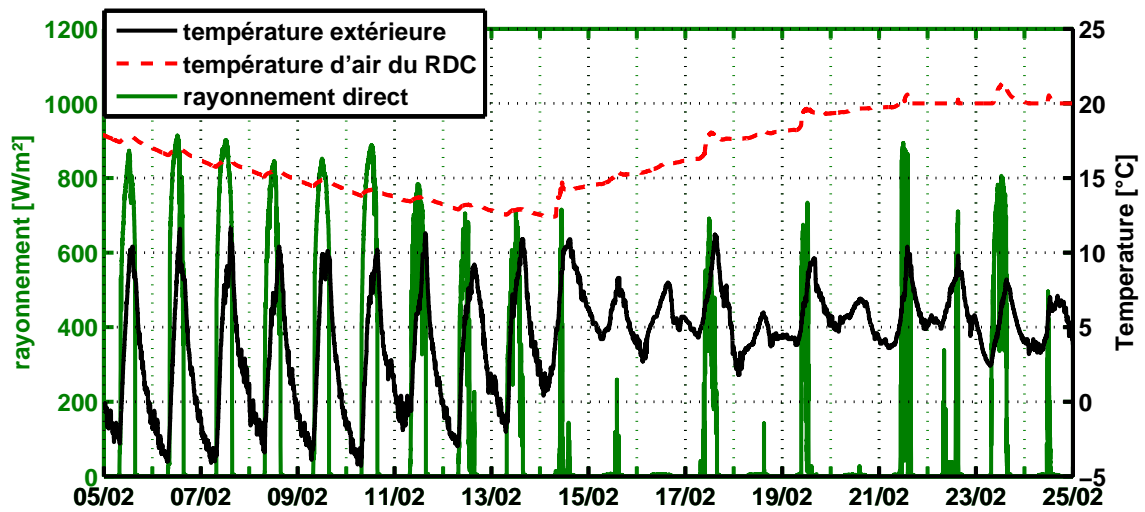
On s'est intéressé à deux périodes en particulier :

- période 1 : du 5 au 25 février 2011
- période 2 : du 20 au 29 mars 2011

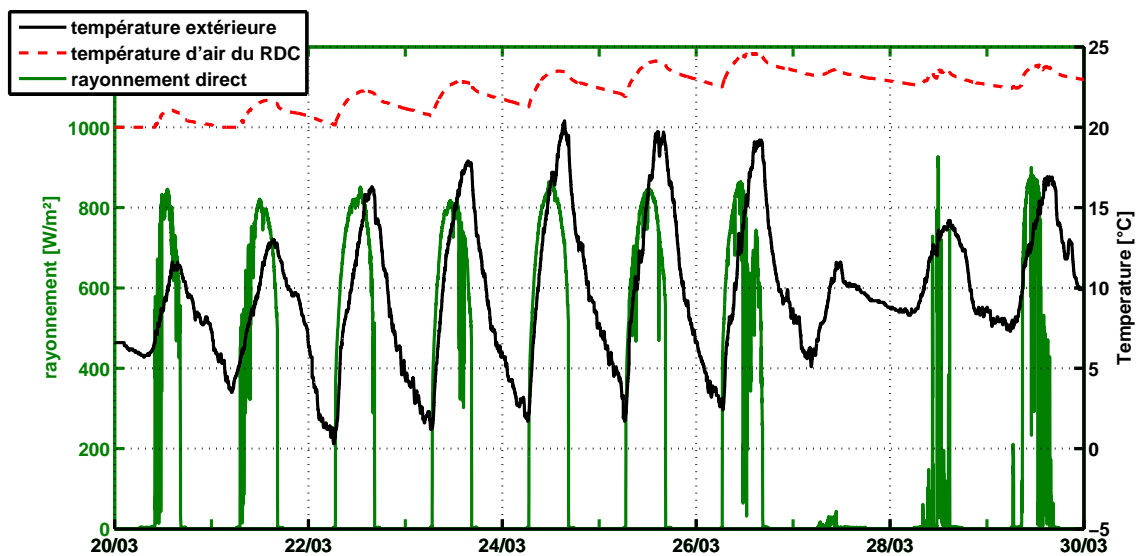
La figure 4.23 représente le résultat de simulation de la température d'air du RDC, la température extérieure et le rayonnement direct pour les deux périodes étudiées. Les scénarios ont été présentés à la figure 2.13, page 45 dans le chapitre 2. Lors de la première période en février, on observe une baisse de la température d'air puis une augmentation due à la consigne de chauffage qui a été modifiée pendant plusieurs jours alors que pendant la deuxième période en mars, la température d'air est en évolution libre, supérieure à la température de consigne. On s'intéressera à l'influence des paramètres en fonction de la période étudiée.

### 4.3.1 Analyse de sensibilité locale

Dans le cas du scénario réel, nous avons tenu compte des charges internes et les figures 4.24 et 4.25 représentent les résultats des indices de sensibilité pour les températures d'air lors de deux périodes. La température d'air varie dans le temps et nous avons étudié les indices de sensibilité à chaque heure de la journée en calculant l'indice de sensibilité réduit de chaque paramètre  $S_i(t)$ . Pour classer les résultats des sorties variant dans le temps par ordre d'importance, la moyenne  $S_{i,m}$ , l'écart type  $S_{i,std}$  et la distance  $S_{i,d}$  ont été calculés sur la période étudiée. La distance est définie



(a) Période 1 : du 5 au 25 février 2011



(b) Période 2 : du 20 au 29 mars 2011

**Figure 4.23** – Résultat de simulation de la température d'air du RDC de la maison I-DM, la température extérieure et le rayonnement direct pour les deux périodes étudiées

comme :

$$S_{i,d} = \sqrt{S_{i,m}^2 + S_{i,std}^2}$$

La distance est une donnée plus intéressante que la moyenne car elle permet de repérer les indices de sensibilité pour lesquels la moyenne est faible mais présentent une grande variabilité. Le calcul de la distance permet de classer les paramètres influents par ordre d'importance. Pour sélectionner les paramètres les plus influents seuls les paramètres ayant une valeur de distance supérieure à 0,5 ont été sélectionnés. Les valeurs de l'indice de sensibilité locale pour chaque pas de temps sont représentées sur les figures 4.24 et 4.25.

**Période 1 : Baisse puis augmentation de la température de consigne** Les figures 4.24a et 4.24b représentent respectivement les indices de sensibilité de la température d'air pour le RDC et l'étage pour la maison I-DM du 5 au 25 février 2011 qui varient en fonction du scénario. Entre les niveaux, on remarque que les indices de sensibilité des paramètres ont les mêmes tendances. Du 5 au 13 février, on a un scénario hors gel et du 14 au 25 février, c'est un scénario normal. Lorsque la température d'air est égale à la température de consigne, les indices de sensibilité sont nuls car la modification de la valeur d'un paramètre ne modifie pas la température d'air. A partir du 21 février, l'étude des indices de sensibilité locale n'est donc plus exploitable.

Les indices de sensibilité de la résistance électrique et la transmission du vitrage extérieur double augmentent à partir du 14 février, jour où la température de consigne est augmentée et les volets sont ouverts durant la journée. Pour l'indice de sensibilité de la transmission du vitrage extérieur double, l'augmentation de sa valeur dépend du rayonnement solaire. S'il y a du rayonnement solaire comme pour le 17 et 19 février l'indice de sensibilité augmente durant la journée.

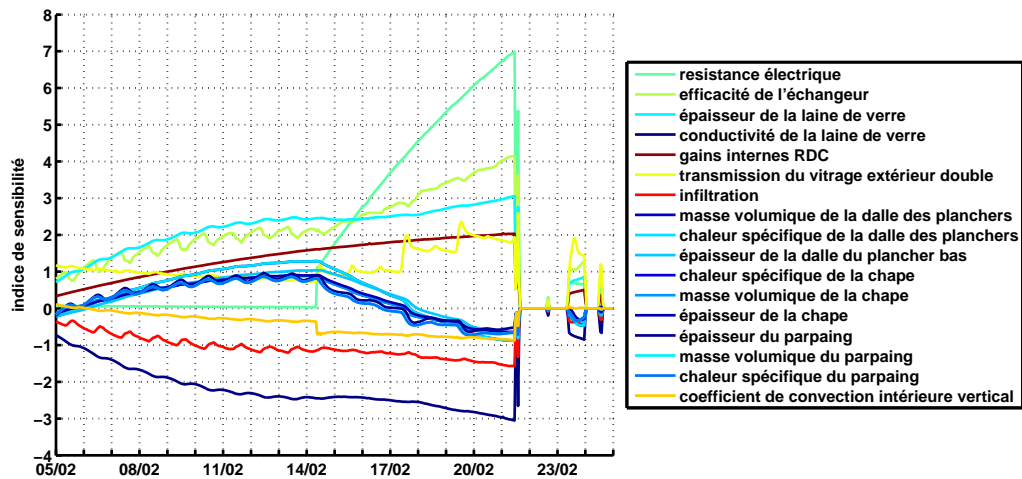
La conductivité et l'épaisseur de la laine de verre sont des paramètres influents et la valeur de leur indice de sensibilité augmente continuellement jusqu'au 21 février.

Les gains internes sont un paramètre influent et on tient compte du scénario réel pour déterminer une bande d'incertitude pour la température d'air dans la maison I-DM. Toutefois les charges internes dégagés par les centrales d'acquisition sont mal connues et on souhaite connaître la proportion de l'influence de ces charges sur le résultat de la température d'air.

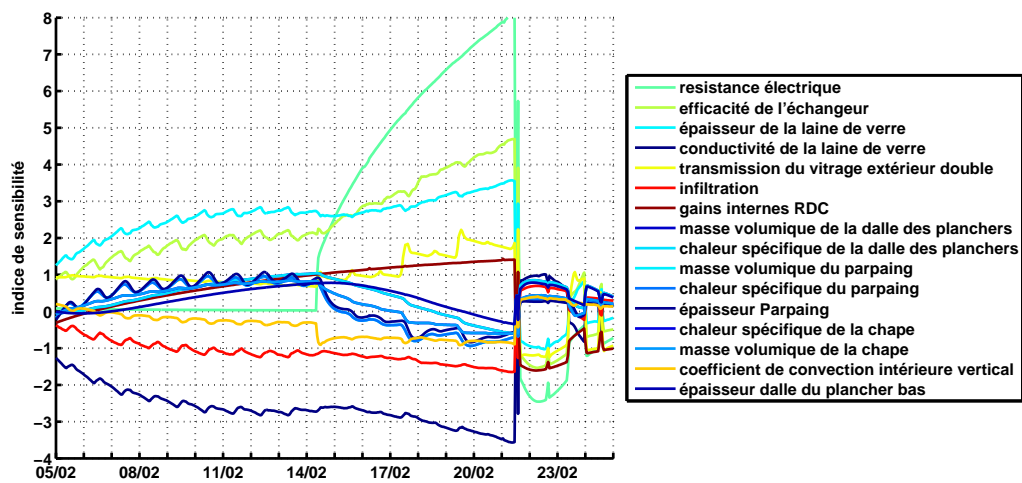
Les paramètres en couleur bleu relatifs à la structure du bâtiment ont des valeurs d'indices de sensibilité semblables entre eux à l'exception de la laine de verre. Ces paramètres sont :

1. la masse volumique de la dalle des planchers
2. la chaleur spécifique de la dalle des planchers
3. l'épaisseur de la dalle du plancher bas
4. la chaleur spécifique de la chape





(a) RDC



(b) Étage

**Figure 4.24** – Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour la maison I-DM pour la température d'air du RDC et de l'étage du 5 au 24 février 2011

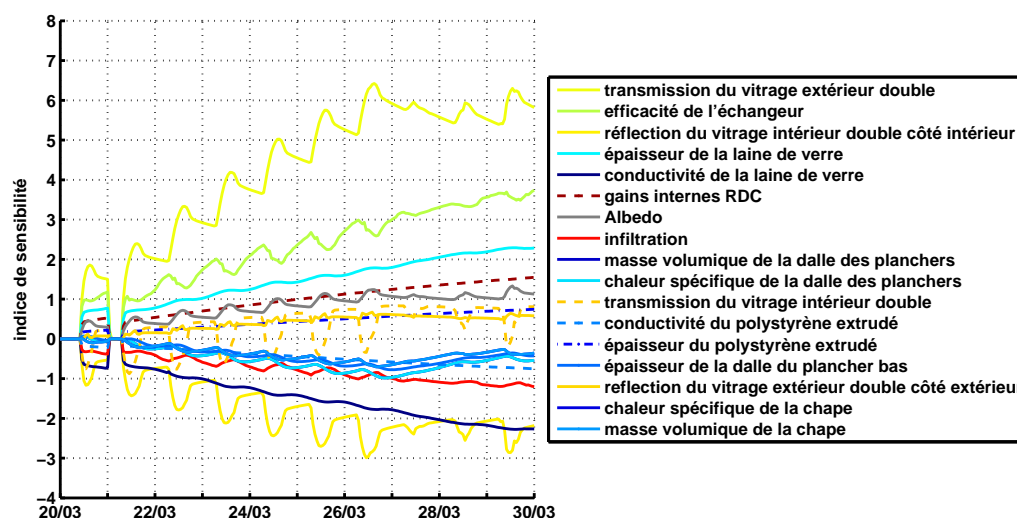
#### 4.3 Cas 2 : Incertitudes associées aux températures d'air intérieur

5. la masse volumique de la chape
6. l'épaisseur de la chape
7. l'épaisseur du parpaing
8. la masse volumique du parpaing
9. la chaleur spécifique du parpaing

Ces paramètres jouent un rôle sur l'inertie. Lors de la période hors gel, leurs valeurs d'indices de sensibilité sont positives et le fait d'augmenter ces paramètres impacte la sortie du modèle de façon positive. La quantité d'énergie emmagasinée dans ces matériaux sera plus importante et la température d'air diminuera moins. Lors de la remise en route du chauffage, leurs indices de sensibilité diminuent jusqu'à devenir négatifs. La masse thermique des murs doit être chauffée ce qui empêche une remontée rapide de la température d'air. L'augmentation des valeurs des paramètres relatifs à l'inertie du bâtiment dans une période de remontée en température fait donc obstacle à la remontée de la température d'air de la zone.

Le dernier paramètre influent sélectionné ayant une valeur de distance supérieure à 0,5 est le coefficient de convection intérieure vertical dont l'incertitude est élevée. L'augmentation de ce paramètre a un effet de diminution de la température d'air.

**Période 2 : Évolution libre des températures** La figure 4.25 représente les indices de sensibilité pour la température d'air pour le RDC de la maison I-DM du 20 au 30 mars 2011. Les résultats pour l'étage n'ont pas été représentés car la figure 4.24 a montré qu'ils étaient semblables entre les deux niveaux. Durant cette période, les scénarios n'ont pas été modifiés.



**Figure 4.25** – Résultat de l'analyse de sensibilité locale pour la maison I-DM pour la température d'air du RDC du 20 au 30 mars 2011

Au début des journées du 20 et 21 mars, tous les indices de sensibilité sont nuls. Durant ces courtes périodes la température d'air est égale à la température de consigne. Les paramètres influents sont l'efficacité de l'échangeur, l'épaisseur et la conductivité de la laine de verre, les gains internes du RDC, les infiltrations, la transmission du vitrage extérieur double, la réflexion du vitrage intérieur double côté intérieur, l'albédo et quatre paramètres relatifs à l'inertie du bâtiment, la masse volumique et la chaleur spécifique de la dalle des planchers, la masse volumique et la chaleur spécifique de la chape.

Pour les deux périodes étudiées du 5 au 24 février et du 20 au 30 mars, les valeurs des indices de sensibilité des paramètres pour la température d'air ne sont pas identiques car elle dépendent de la période d'étude et du scénario. Pour les deux périodes les paramètres communs les plus influents sont l'efficacité de l'échangeur, l'isolation des murs verticaux, les charges internes et les débits d'infiltration. Dans le cas de la température d'air, le débit de ventilation n'est pas influent, il est classé en 50<sup>ème</sup> position. Ce paramètre ne sera pas considéré comme influent contrairement au cas concernant les besoins de chauffage. Par la suite et pour ne pas surcharger l'étude, on s'est seulement intéressé à la période de février.

### 4.3.2 Étude des corrélations

Dans le cas des températures d'air, l'étude de corrélation est possible et permet de grouper les paramètres dont les effets sont semblables. Le degré de corrélation entre deux paramètres  $X_i$  et  $X_j$  est défini comme :

$$r_{i,j} = \frac{\frac{1}{N} \sum (S_i(t) - S_{i,m})(S_j(t) - S_{j,m})}{S_{i,std}S_{j,std}} \quad (4.2)$$

La figure 4.26 présente les valeurs des degrés de corrélation entre paramètres. L'analyse des corrélations temporelles entre les indices de sensibilité aux différents paramètres montre que les paramètres influents peuvent être groupés en quatre paramètres. Dans le tableau 4.6 les paramètres ont été triés en fonction de leur valeur de distance et les corrélations ont été prises en compte pour des valeurs absolues de  $r_{i,j}$  supérieures à 0,99. Cette étude a permis de dégager 10 groupes de paramètres sur les 17 paramètres influents considérés et pour caractériser l'incertitude du groupe du paramètre il est possible de sélectionner seulement un paramètre par groupe .

#### 4.3 Cas 2 : Incertitudes associées aux températures d'air intérieur

	résistance électrique	efficacité de l'échangeur	conductivité de la laine de verre	épaisseur de la laine de verre	gains internes RDC	transmission du vitrage extérieur double	infiltration	masse volumique de la dalle des planchers	chaleur spécifique de la dalle des planchers	épaisseur dalle 16cm	chaleur spécifique de la chape	masse volumique de la chape	épaisseur de la chape	épaisseur parpaing	masse volumique parpaing	chaleur spécifique parpaing	coefficient de convection intérieure vertical
résistance électrique	1.00	0.84	-0.62	0.62	0.73	0.75	-0.68	-0.64	-0.64	-0.57	-0.72	-0.72	-0.69	-0.75	-0.80	-0.80	-0.87
efficacité de l'échangeur		1.00	-0.93	0.93	0.96	0.82	-0.96	-0.22	-0.22	-0.15	-0.30	-0.30	-0.27	-0.32	-0.40	-0.40	-0.92
conductivité de la laine de verre			1.00	-1.00	-0.98	-0.69	0.99	-0.13	-0.13	-0.19	-0.05	-0.05	-0.08	-0.02	0.06	0.06	0.86
épaisseur de la laine de verre				1.00	0.98	0.69	-0.99	0.13	0.13	0.19	0.05	0.05	0.08	0.03	-0.06	-0.06	-0.86
gains internes RDC					1.00	0.69	-0.98	0.03	0.03	0.10	-0.07	-0.07	-0.03	-0.11	-0.19	-0.19	-0.93
transmission du vitrage extérieur double						1.00	-0.72	-0.47	-0.47	-0.43	-0.51	-0.51	-0.49	-0.50	-0.56	-0.56	-0.65
infiltration							1.00	-0.05	-0.05	-0.10	0.04	0.04	0.01	0.06	0.14	0.14	0.88
masse volumique de la dalle des planchers								1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	0.96	0.95	0.95	0.19
chaleur spécifique de la dalle des planchers									1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	0.96	0.95	0.95	0.19
épaisseur dalle 16cm										1.00	0.97	0.97	0.98	0.93	0.91	0.91	0.10
chaleur spécifique de la chape											1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.98	0.30
masse volumique de la chape												1.00	1.00	0.99	0.98	0.98	0.30
épaisseur de la chape													1.00	0.98	0.97	0.97	0.26
épaisseur parpaing														1.00	1.00	1.00	0.35
masse volumique parpaing															1.00	1.00	0.43
chaleur spécifique parpaing																1.00	0.43
coefficient de convection intérieure vertical																	1.00

Figure 4.26 – Valeur des degrés de corrélation entre les paramètres

N°	groupe	paramètre
1	résistance électrique	résistance électrique
2	efficacité de l'échangeur	efficacité de l'échangeur
3	conduction dans l'isolant	conductivité de la laine de verre
		épaisseur de la laine de verre
4	gains internes RDC	gains internes RDC
5	transmission du vitrage extérieur double	transmission du vitrage extérieur double
6	débit d'infiltration	débit d'infiltration
7	inertie de la dalle des planchers	masse volumique de la dalle des planchers
		chaleur spécifique de la dalle des planchers
		épaisseur de la dalle
8	inertie de la chape	chaleur spécifique de la chape
		masse volumique de la chape
		épaisseur de la chape
9	inertie du parpaing	épaisseur du parpaing
		masse volumique parpaing
		chaleur spécifique parpaing
10	coefficient de convection intérieure vertical	coefficient de convection intérieure vertical

**Table 4.6** – Analyse des corrélations triées par ordre d'importance pour la température d'air du RDC

### 4.3.3 Analyse d'incertitude

Une comparaison entre la simulation et la mesure tout en tenant compte des différentes incertitudes a pu être effectuée. A l'aide de l'analyse de sensibilité locale sur les résultats de la température d'air du RDC et de l'étage de la maison I-DM ainsi que l'étude des corrélations, 10 paramètres considérés comme influents ont été sélectionnés.

Les paramètres sont

- la puissance de la résistance électrique
- l'efficacité de l'échangeur
- l'épaisseur de la laine de verre
- la conductivité de la laine de verre
- les gains internes du RDC
- la transmission du vitrage extérieur
- le débit d'infiltration
- l'épaisseur de la dalle
- l'épaisseur du parpaing
- le coefficient de convection intérieure verticale

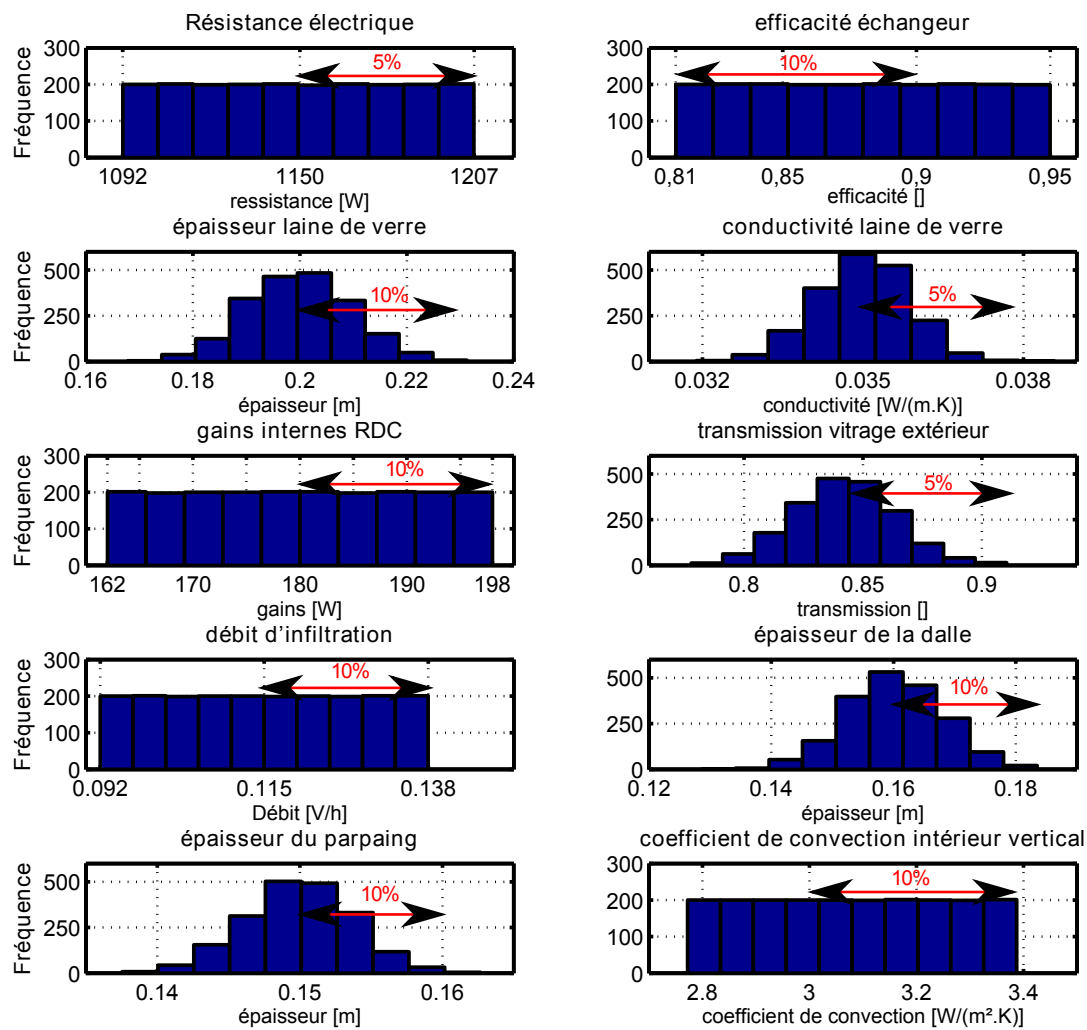
La masse volumique et la chaleur spécifique de la dalle des planchers n'ont pas été considérées. Comme pour la dalle des planchers, pour le parpaing seule l'épaisseur a été considérée. Les paramètres relatifs à l'inertie de la chape n'ont pas été considérés dans la suite de l'étude car ces paramètres sont fortement corrélés aux paramètres de l'inertie du parpaing (voir figure 4.26). Le fait de ne pas considérer certains paramètres permet de réduire le nombre de paramètres et aussi d'éviter les corrélations entre les paramètres.

Le tableau 4.7 représente les valeurs des 10 paramètres considérés dans l'analyse d'incertitude et les plages de variation des paramètres. La figure 4.27 représente l'incertitude et l'échantillonnage des paramètres influents pour la maison I-DM.

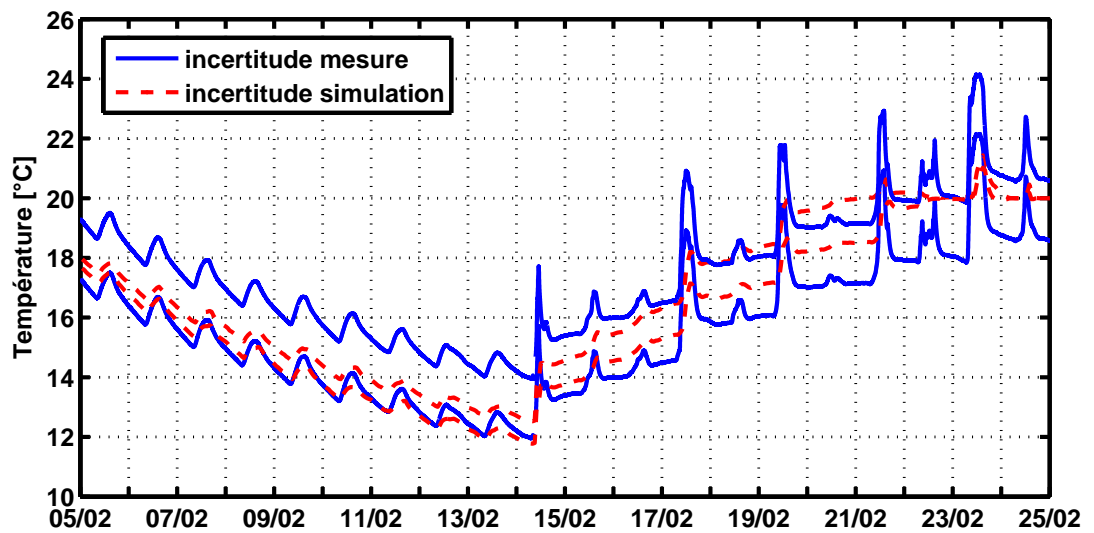
La figure 4.28 représente le résultat de l'analyse d'incertitude pour la température d'air du RDC et de l'étage pour 2000 simulations du 5 au 24 février 2011. Sur la même figure est représentée la plage d'incertitude de la mesure de la température d'air du RDC et de l'étage. La plage d'incertitude est définie comme :

$$\pm \Delta T = \mu_T \pm 2\sigma_T \quad (4.3)$$

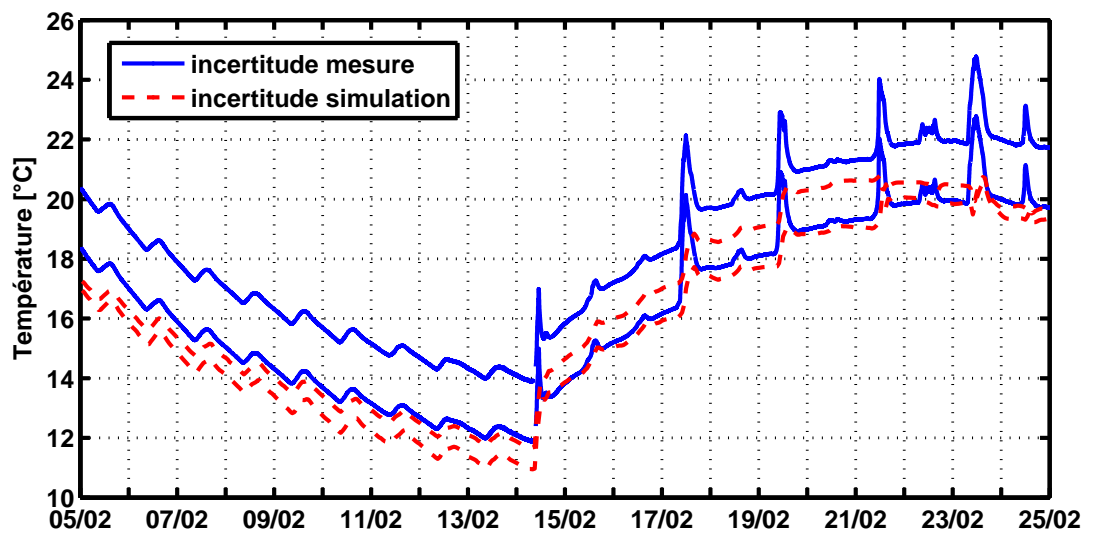
En tenant compte des plages d'incertitude de la mesure et de la simulation, pour le cas de la température d'air du RDC, il y a constamment recoupement entre les résultats de mesure et de simulation. Pour le cas de l'étage, avant le 14 février il n'y a aucun recoupement entre la modélisation et l'expérimentation et après le 14 février la plage d'incertitude de la simulation est en partie comprise dans la plage d'incertitude de la mesure. Le modèle numérique représente donc correctement le RDC de la maison I-DM en considérant les incertitudes mais ce n'est pas le cas pour l'étage. Sur la figure 4.28, on observe que la plage d'incertitude de la simulation est



**Figure 4.27** – Incertitude et échantillonnage des paramètres influents pour la maison I-DM pour le scénario réel



(a) RDC



(b) Étage

Figure 4.28 – Comparaison de l'analyse d'incertitude pour la maison I-DM pour la température d'air du RDC et de l'étage du 5 au 24 février 2011



n°	Paramètres	Valeur	distribution	incertitude
1	résistance électrique	1150 W	uniforme	+/- 5%
2	efficacité échangeur	0.90	uniforme	+/- 10%
3	épaisseur laine de verre	0.2 m	normale	+/- 10%
4	conductivité laine de verre	0.035 W/(m.K)	normale	+/- 5%
5	gains internes RDC	180 W	uniforme	+/- 10%
6	transmission vitrage extérieur	0.842	normale	+/- 5%
7	débit d'infiltration	0.115V/h	uniforme	+/- 10%
8	épaisseur de la dalle	0.16 m	normale	+/- 10%
9	épaisseur du parpaing	0.15 m	normale	+/- 10%
10	coefficient de convection intérieure verticale	3,08 W/(m <sup>2</sup> .K)	uniforme	+/- 10%

**Table 4.7** – Tableau des paramètres et plage de variation pour la maison I-DM pour le scénario réel

inférieure à la plage d'incertitude de la mesure.

L'analyse d'incertitude a permis de définir une plage d'incertitude pour les résultats de modélisation de la température d'air du RDC et de l'étage du 5 au 25 février 2011 en considérant les 10 paramètres les plus influents sur cette période mais cette étude ne permet pas de connaître l'effet de l'incertitude des paramètres sur la température d'air de la maison I-DM c'est pourquoi l'analyse de sensibilité globale est utilisée.

#### 4.3.4 Analyse de sensibilité globale

L'analyse de sensibilité globale a été effectuée en considérant les 10 paramètres sélectionnés à l'aide de l'analyse de sensibilité locale et de l'étude des corrélations. C'est la méthode de Sobol qui a été appliquée avec un nombre de simulation égal à 6669. On a étudié les indices de sensibilité de la température d'air du RDC et de l'étage de la maison I-DM pour la période de février.

La figure 4.29 représente les résultats cumulés des indices du premier ordre et total pour la température d'air du RDC du 5 au 24 février. Avant le 21 février, on observe sur la figure 4.29a que la somme des indices du premier ordre est égale à 0,9 et que sur la figure 4.29b les indices totaux sont égaux à environ 1,1. Après le 21 février, la somme des indices du premier ordre et des indices totaux sont saccadés car la température d'air a atteint la consigne (voir figure 4.23a). La figure 4.29 ne permet pas de définir les paramètres ayant un indice total supérieur à son indice du premier ordre.

La figure 4.30 présente les indices de sensibilité globaux du premier ordre et totaux par paramètre pour la température d'air du RDC du 5 au 25 février 2011. Pour de nombreux paramètres l'indice du premier ordre est égal à l'indice total sauf pour

les paramètres de l'épaisseur de la laine de verre et le débit d'infiltration. Pour ces paramètres les indices totaux sont supérieurs aux indices du premier ordre et ces paramètres ont donc des interactions avec d'autres paramètres. La suite de l'analyse s'est intéressée à l'étude des indices du premier ordre de la température d'air du RDC et de l'étage.

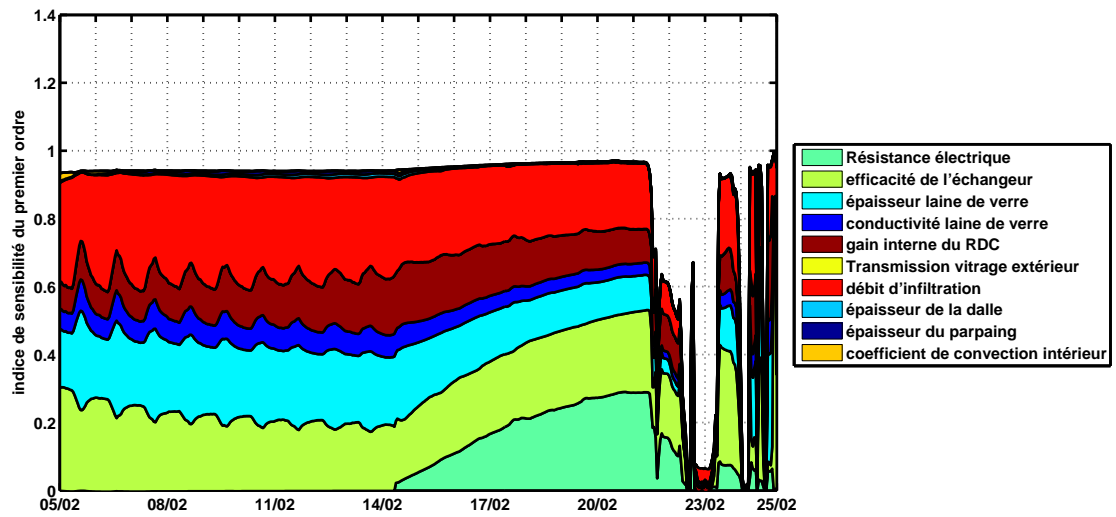
La figure 4.31 représente les indices du premier ordre pour la température d'air du RDC et de l'étage du 5 au 24 février. Les paramètres n'ont pas été triés par ordre d'importance. Sur la figure 4.31 les paramètres ayant leurs indices de sensibilité élevés à un temps donné sont facilement identifiables. De plus comme pour l'analyse de sensibilité locale, les indices de sensibilité du premier ordre ont les mêmes tendances entre le RDC et l'étage. Le changement de scénario qui a lieu le 14 février implique une modification de la tendance des valeurs des indices de sensibilité et on va étudier les deux périodes.

**Période de baisse de la température** Du 5 au 14 février, les paramètres les plus influents de la température d'air pour le RDC et l'étage sont :

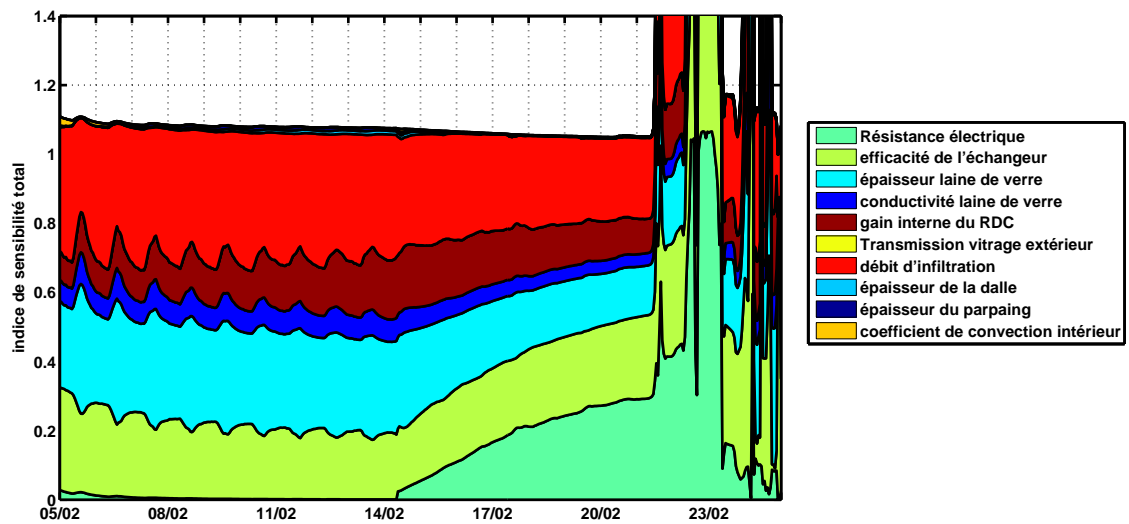
- le débit d'infiltration
- l'épaisseur de la laine de verre
- l'efficacité de l'échangeur
- les gains internes du RDC
- la conductivité de la laine de verre

Tous les indices de sensibilité de ces paramètres ont une amplitude jour/nuit. Durant une journée la température d'air est à son minimum en fin de nuit et à son maximum en milieu de journée, on observe la même tendance pour les indices de sensibilité des paramètres de l'épaisseur et la conductivité de la laine de verre et les gains internes du RDC. Pour les paramètres du débit d'infiltration et de l'efficacité de l'échangeur, les indices de sensibilité de ces paramètres ont un comportement inverse à la température d'air et quand la température d'air journalière est à son maximum les indices de sensibilité de ces deux paramètres sont à leur valeur minimale. Durant cette période le temps est ensoleillé et la température d'air intérieure varie quotidiennement avec des amplitudes de température d'environ  $0,5^{\circ}\text{C}$  (voir figure 4.23a), les indices de sensibilité étant directement influencés par ces variations.

**Période de remontée en température** A partir du 14 février, la consigne de chauffage est augmentée, la résistance électrique se met en route et son indice de sensibilité augmente jusqu'au 21 février, jour où la consigne est atteinte. Sur la figure 4.31, on observe que la somme des indices de sensibilité du premier ordre est égale à une valeur constante d'environ 0,95 du 5 au 21 février. Après le 14 février, les indices du premier ordre des paramètres du débit d'infiltration, de l'épaisseur de la laine de verre, des gains internes du RDC et de la conductivité de la laine de verre diminuent et seuls les paramètres de la résistance électrique et de l'efficacité de l'échangeur ont leur indice du premier ordre qui augmente après le 14 février. Sur la figure 4.23a, du 14 au 21 février, les journées dont le rayonnement direct a atteint des valeurs supérieures à  $600\text{W/m}^2$  sont les 14, 17 et 19 février. Durant ces journées, on observe des amplitudes de température d'environ  $2^{\circ}\text{C}$  entre le jour et



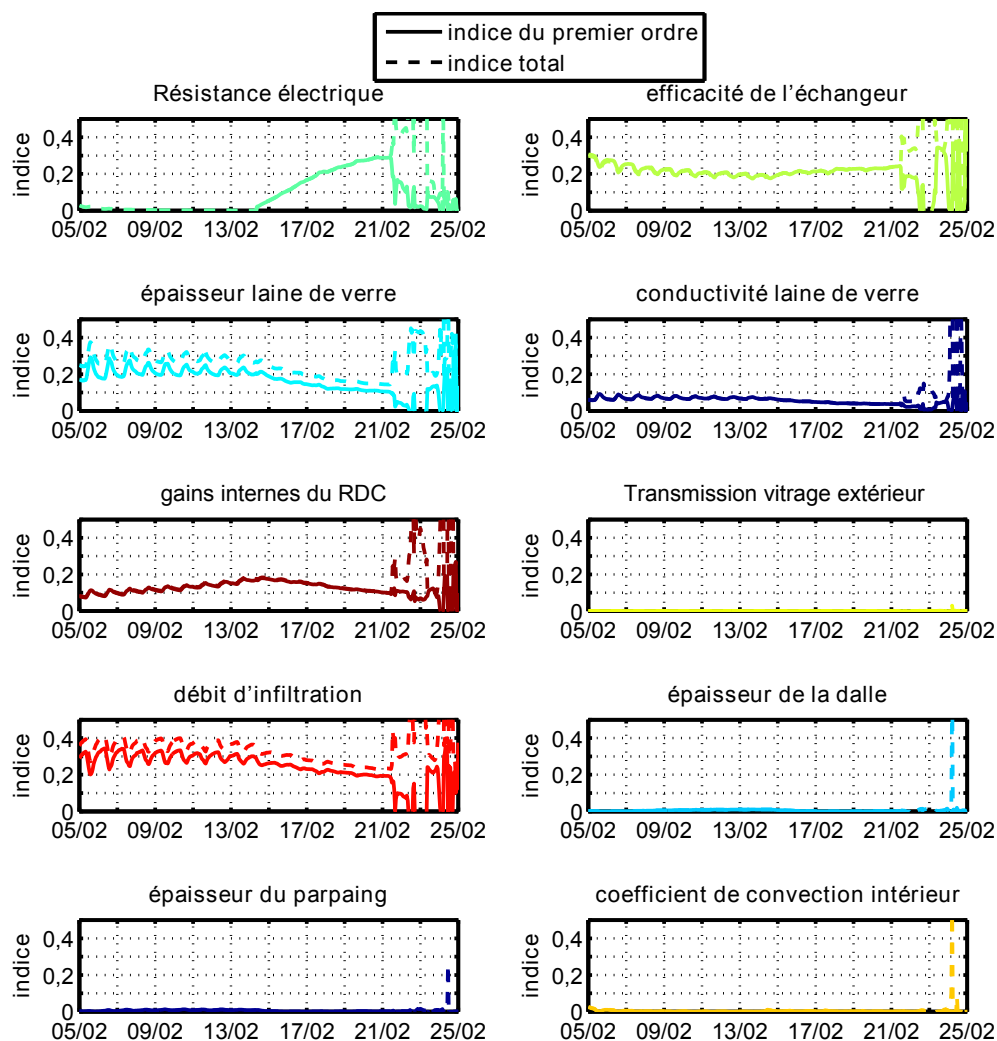
(a) Indice du 1<sup>er</sup> ordre



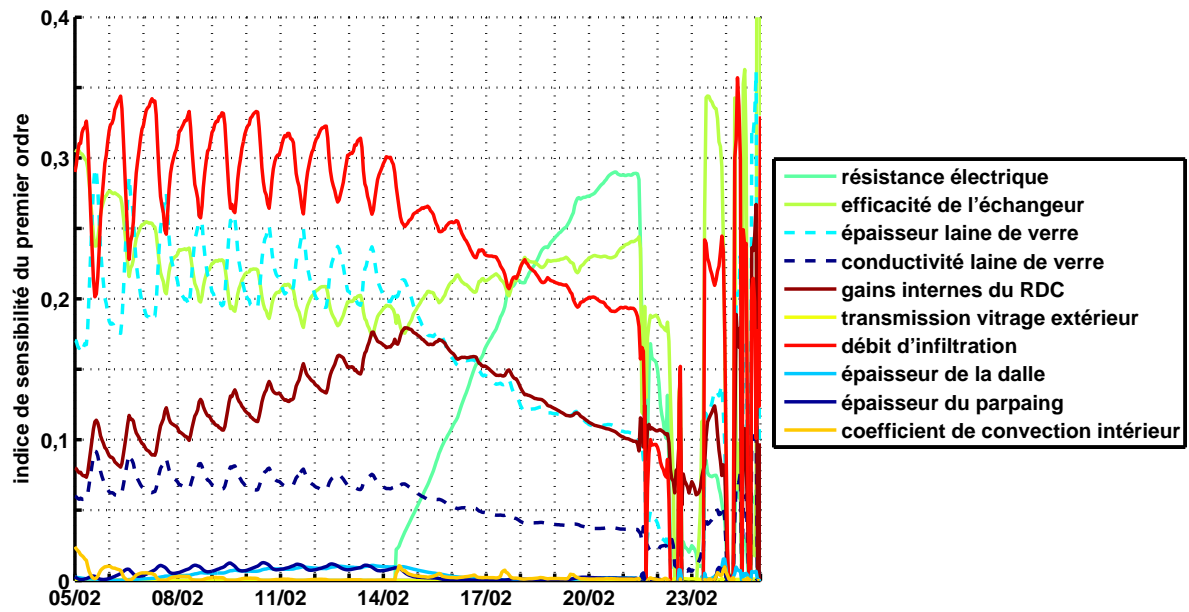
(b) Indice total

**Figure 4.29** – Indices de sensibilité globale du premier ordre et total pour la température d'air du RDC de la maison I-DM du 5 au 25 février 2011

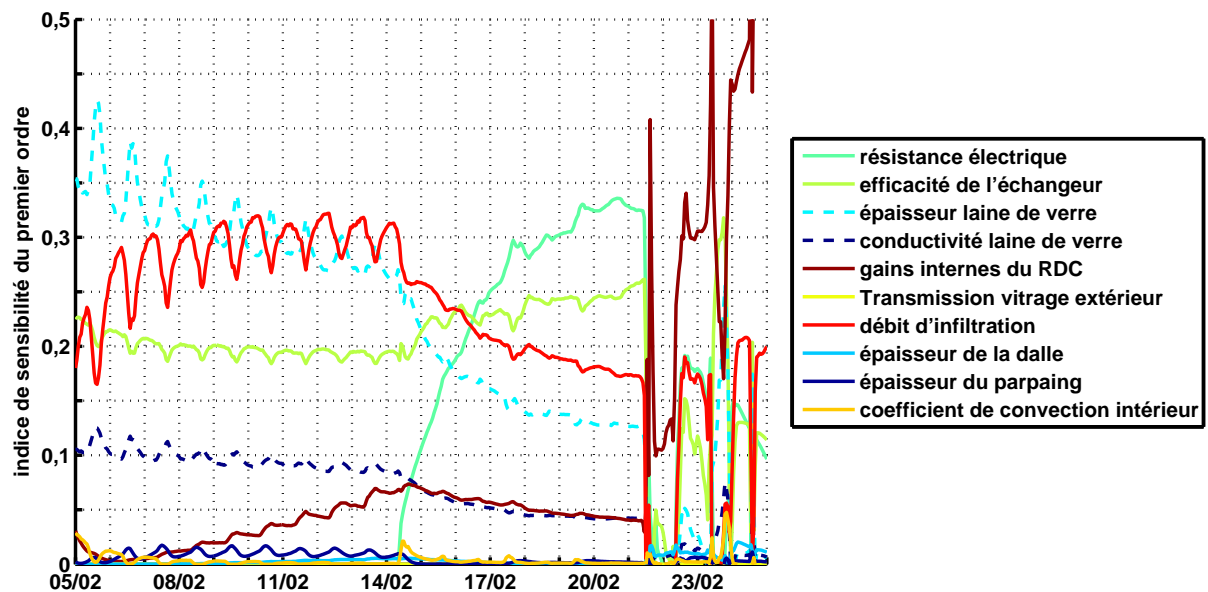
### 4.3 Cas 2 : Incertitudes associées aux températures d'air intérieur



**Figure 4.30** – Indices de sensibilité globale du premier ordre et total par paramètre pour la température d'air du RDC de la maison I-DM du 5 au 25 février 2011



(a) Température d'air RDC



(b) Température d'air étage

**Figure 4.31** – Indices de sensibilité du premier ordre pour la température d'air du RDC et de l'étage de la maison I-DM du 5 au 25 février 2011

la nuit. Pour ces mêmes jours, on observe de très faibles amplitudes sur les indices de sensibilité dont la valeur est supérieure à 0,1.

L'analyse de sensibilité globale appliquée aux températures d'air du RDC et de l'étage de la maison I-DM du 5 au 25 février, a permis de définir six paramètres influents dans leurs plages d'incertitudes qui sont le débit d'infiltration, l'épaisseur de la laine de verre, l'efficacité de l'échangeur, les gains internes du RDC, la conductivité de la laine de verre et la résistance électrique. A partir du 21 février les indices de sensibilité sont biaisés car la température respecte la consigne de chauffage. Deux scénarios distincts caractérisaient cette période : le scénario hors gel et le scénario dit normal. Durant ces deux scénarios, six paramètres sont influents mais en fonction du scénario les indices de sensibilité du premier ordre n'ont pas les mêmes tendances. Les indices de sensibilité du premier ordre varient en fonction de la variation de la température d'air mais la somme des indices de sensibilité reste constante du 5 au 21 février. Les incertitudes de ces six paramètres sont responsables de la majeure partie des incertitudes sur la température d'air pour le cas de la maison I-DM et selon le scénario du mois de février.

## 4.4 Conclusion

Dans le cadre de ces travaux les paramètres influents sur le besoin de chauffage de trois bâtiments, la maison I-DM, la maison I-BB et une maison RT2005 ainsi que la température d'air de la maison I-DM ont été étudiés à l'aide des analyses de sensibilité. Les analyses de sensibilité sont des méthodes permettant d'observer la contribution des paramètres d'entrées d'un modèle à la variation des sorties du modèle. Différentes analyses de sensibilité existent et dans cette étude trois ont été utilisées :

- l'analyse de sensibilité locale
- l'analyse d'incertitude
- l'analyse de sensibilité globale

L'analyse de sensibilité locale a permis d'identifier un nombre restreint de paramètres (environ 10) sur la totalité des paramètres utilisés dans la simulation (environ 140 paramètres). Cette analyse utilise la méthode de perturbation d'un paramètre à la fois. Un indice de sensibilité réduit est obtenu et permet de classer les paramètres par ordre d'influence. L'analyse de sensibilité globale permet d'identifier les effets des paramètres sur les sorties du modèle numérique en tenant compte des incertitudes des paramètres. Les analyses de sensibilité globale utilisant la méthode de FAST ou de Sobol ont été utilisées. Ces analyses demandent un grand nombre de simulations avec un nombre restreint de paramètres. L'analyse d'incertitude permet d'identifier une plage d'incertitude.

Pour le besoin de chauffage, les paramètres influents sont identiques pour les maisons I-DM et I-BB malgré la différence des modes constructifs. L'efficacité de l'échangeur, le débit d'infiltration et le débit de ventilation sont les paramètres les plus influents. Pour la I-DM, l'isolant constitué de laine de verre avec son épaisseur est un para-

mètre influent. Pour la maison RT 2005, les paramètres les plus influents sont le débit de ventilation et d'infiltration et l'épaisseur de la laine de verre. Entre une maison ayant des besoins de chauffage autour de  $15\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$  et une maison RT2005 avec des besoins autour de  $110\text{kWh}/\text{m}^2.\text{an}$ , les paramètres influents font partie des mêmes catégories qui sont le renouvellement d'air de la maison et l'isolation. Ces résultats montrent dans le cas d'une rénovation quelque soit la performance énergétique du bâtiment que l'isolation et le renouvellement d'air sont les paramètres dont une attention particulière doit être apportée pour améliorer l'efficacité énergétique.

Concernant la température d'air dans la maison I-DM, une comparaison entre les résultats de simulation et d'expérimentation a pu être effectuée tout en tenant compte des différentes incertitudes. Le modèle numérique représentait correctement l'expérimentation dans le cas de la température d'air du RDC mais dans le cas de la température d'air de l'étage les bandes d'incertitudes ne se recoupaient pas entre la mesure et la simulation pour la période précédant le 14 février 2011. Pour que les plages d'incertitudes se recoupent, il y a la possibilité d'agrandir les plages d'incertitudes des paramètres car la définition de certaines plages d'incertitude de paramètres a pu être trop optimiste. Une seconde possibilité plus pertinente consiste à avoir une meilleure connaissance des paramètres influents déterminés à l'aide des analyses de sensibilité globale. Dans le cas des maisons I-DM et I-BB, une meilleure connaissance des paramètres de l'efficacité de l'échangeur, du débit de ventilation et du débit d'infiltration permettrait de réduire l'incertitude sur le résultat de simulation et permettrait ainsi de pouvoir effectuer un diagnostic énergétique plus fiable et une analyse de dysfonctionnement. Dans le cas de la maison I-DM, si l'incertitude de la mesure est améliorée sur certains paramètres comme l'efficacité de l'échangeur ou le débit d'infiltration il y aurait la possibilité d'expliquer l'écart entre mesure et simulation. Cet écart provient soit du modèle numérique soit d'un dysfonctionnement dans la maison qui pourrait être identifié.

De nombreuses applications sont possibles à l'aide de cette méthodologie et la connaissance des paramètres influents pourrait permettre :

- de choisir des matériaux comportant des incertitudes faibles sur les paramètres physiques permettant de réduire l'incertitude sur le bilan énergétique
- de choisir une métrologie adaptée, les paramètres influents étant les paramètres les plus responsables de la dérive de la performance énergétique du bâtiment, une meilleure connaissance de ces paramètres réduirait l'incertitude sur le résultat.

---

## Conclusion et perspectives

---

Depuis le premier sommet de l'environnement à Stockholm en 1972, la prise de conscience écologique n'a pas cessé d'évoluer. La construction de bâtiments à basse consommation réduisant presque d'un facteur 10 la consommation des bâtiments par rapport à la moyenne du parc existant s'est multipliée durant ces dernières années. Pour aider à la rationalisation de l'utilisation de l'énergie dans le secteur du bâtiment, la simulation thermique dynamique est utilisée et les exigences de précision des calculs se sont accrues et il devient essentiel d'apprécier les incertitudes associées à ces prévisions afin d'améliorer le processus de conception.

Les outils de simulation constituent le moyen le plus raisonnable, en termes de délai et de coût, pour analyser et améliorer les performances énergétiques des bâtiments que ce soit en phase de conception ou de réhabilitation. Cela implique que les outils aient, au préalable, été sujets à des tests rigoureux de validation.

Le concept de «Garantie de Résultat» permettra au maître d'ouvrage de s'engager en limitant les risques dans les nouvelles constructions à haute performance énergétique. Pour cela il est nécessaire de réaliser un suivi du bâtiment nouvellement construit afin de vérifier que ses performances réelles sont bien en adéquation avec les objectifs fixés dans le projet et avec les prescriptions faites lors de la conception. En effet, le maître d'ouvrage voudra connaître les surcoûts de construction et vérifier que ce qui a été prédit correspond à la réalité. L'exemple de la tour Elithis, sensé être le premier bâtiment tertiaire à énergie positive en France, a montré toute la difficulté de prévision des consommations réelles à partir de consommations issues de scénarios conventionnels car il est difficile de fixer une valeur de consommation énergétique compte tenu des aléas possibles durant les différentes phases de la construction du bâtiment. Les objectifs de ces travaux étaient d'identifier les incertitudes de mesure mais aussi les incertitudes liées aux hypothèses de modélisation.

Dans ces travaux, deux bâtiments de la plateforme d'expérimentation INCAS ont été modélisés avec l'outil EnergyPlus et l'analyse de la sensibilité des prévisions du comportement thermique d'un logement individuel vis-à-vis de l'ensemble des paramètres de conception de la maison a permis de repérer les paramètres les plus influents sur la performance. L'analyse de sensibilité locale du modèle est la première étape et consiste à identifier parmi l'ensemble des paramètres du modèle ceux



qui ont une influence sur les résultats de simulation. La deuxième étape a consisté à évaluer les incertitudes associées aux paramètres les plus influents afin de propager cette incertitude dans le code de calcul et d'évaluer l'incertitude sur les résultats. La troisième étape consiste à évaluer la responsabilité de chacun des paramètres sur les incertitudes associées au résultat. Cette dernière étape est traitée au moyen d'une analyse de sensibilité globale sur un jeu de paramètres réduit.

Une étude a porté sur le besoin de chauffage pour trois bâtiments, la maison I-DM, la maison I-BB et une maison RT 2005 et quel que soit le bâtiment étudié, les paramètres influents font partie des mêmes catégories qui sont les pertes par infiltration, le renouvellement d'air de la maison et l'isolation. Les résultats de l'analyse d'incertitude ont montré que l'augmentation du besoin de chauffage entraîne une diminution de l'incertitude relative et une augmentation de la valeur absolue d'incertitude. Pour la I-DM la moyenne du besoin de chauffage est de  $16,8\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$ , son incertitude relative est d'environ 18%. Pour la I-BB la moyenne du besoin de chauffage est égale à  $11,1\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$  et son incertitude relative est environ égale à 23%. Pour la RT 2005 la moyenne du besoin de chauffage est égale à  $113,2\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$  et son incertitude relative est environ égale à 9%. L'augmentation du besoin de chauffage entraîne une diminution de l'incertitude relative et une augmentation de la valeur absolue d'incertitude.

Une seconde étude s'est intéressée à la température d'air de la maison I-DM. A l'aide des différents points de mesure, on a pu identifier différentes sources d'incertitudes sur les champs de température, sur les sollicitations extérieures et sur la distribution aéraulique. On constate une disparité atteignant 20% entre des appareils censés mesurer la même grandeur. Une comparaison tenant compte des incertitudes entre l'expérimentation et la prévision a pu être réalisée mais les résultats ont montré que le modèle numérique ne représentait pas correctement l'expérimentation, ces écarts pouvant provenir du modèle numérique.

Les résultats présentés ici sont issus du cas particulier des maisons INCAS et la méthodologie peut être appliquée à tous types de bâtiment pour connaître l'influence de ses paramètres.

Cette méthodologie pourra être utilisée durant tout le processus de conception d'un bâtiment, des premières esquisses à son exploitation. En phase de conception, cette méthodologie permettra d'orienter les choix architecturaux en évitant des options dont les résultats sont causés par l'incertitude de simulation et par conséquent peu fiables. En phase d'exploitation, l'analyse de sensibilité locale permettra d'identifier les points de mesure les plus pertinents, afin de réduire l'incertitude des paramètres les plus influents pour effectuer un diagnostic énergétique plus fiable du bâtiment.

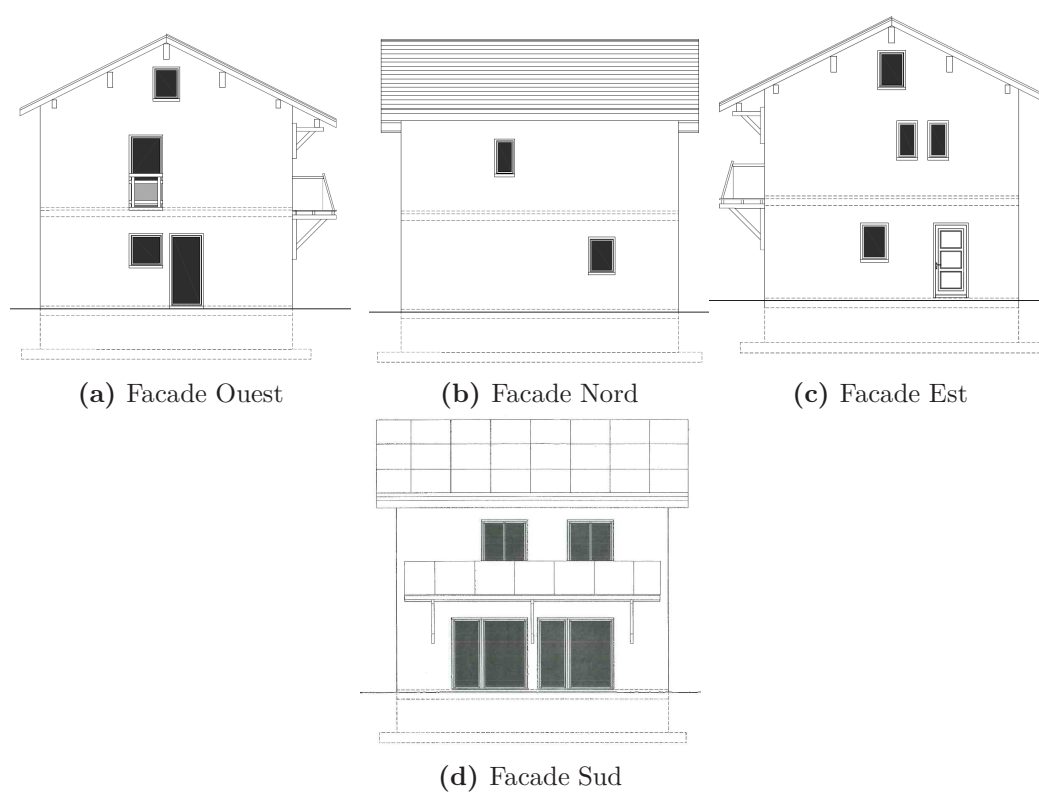
Pour permettre au plus grand nombre l'utilisation de ces méthodes, il faudrait les implémenter directement dans les codes de simulation les plus utilisés par les bureaux d'études et cabinets d'architectes. Le temps de calcul pourrait être un frein à la généralisation de l'utilisation de cette méthodologie et pour le réduire, l'étude de

la surface de réponse sera une piste à explorer. Plusieurs méthodes existent comme la régression linéaire ou encore les réseaux de neurones et une attention particulière devra être portée au fait de ne pas réduire la précision de la simulation.

L'identification des paramètres influents et la mise en place d'un suivi du bâtiment à l'aide de l'expérimentation permettra à l'aide de quelques équations de créer un modèle reproduisant correctement les mesures. L'expérimentation et la simulation en temps réel permettant alors d'identifier les dérives du modèle numérique par rapport aux mesures ce qui permettra donc d'analyser et de corriger un éventuel dysfonctionnement.



## Annexe A: Façades des maisons expérimentales



**Figure 32** – Façades des maisons expérimentales

## Annexe B: Plan de la maison double mur

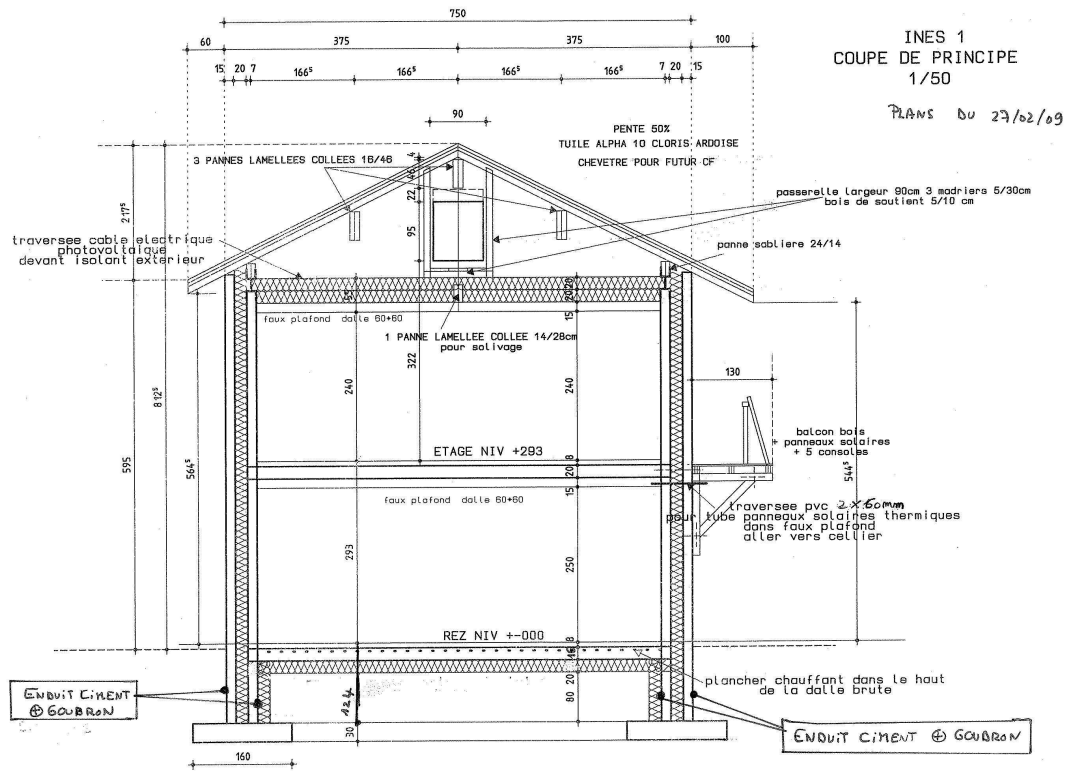


Figure 33 – Coupe de principe de la maison I-DM

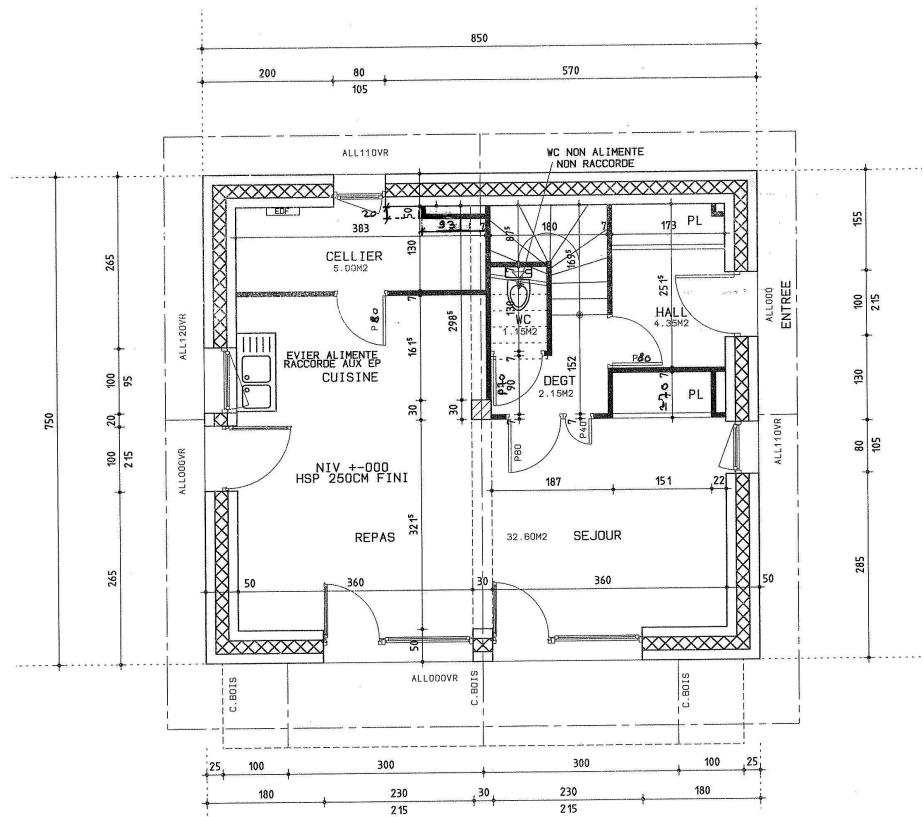


Figure 34 – Plan du RDC de la maison I-DM

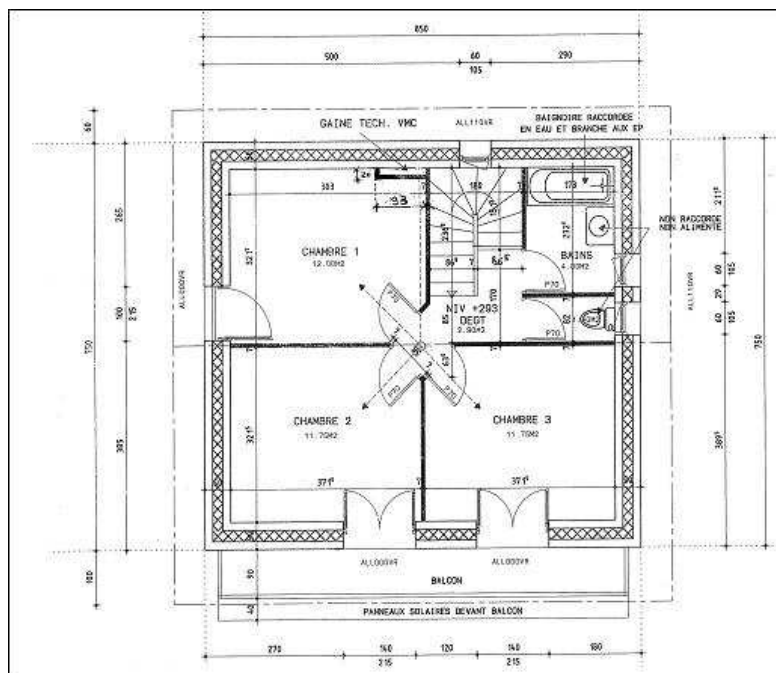


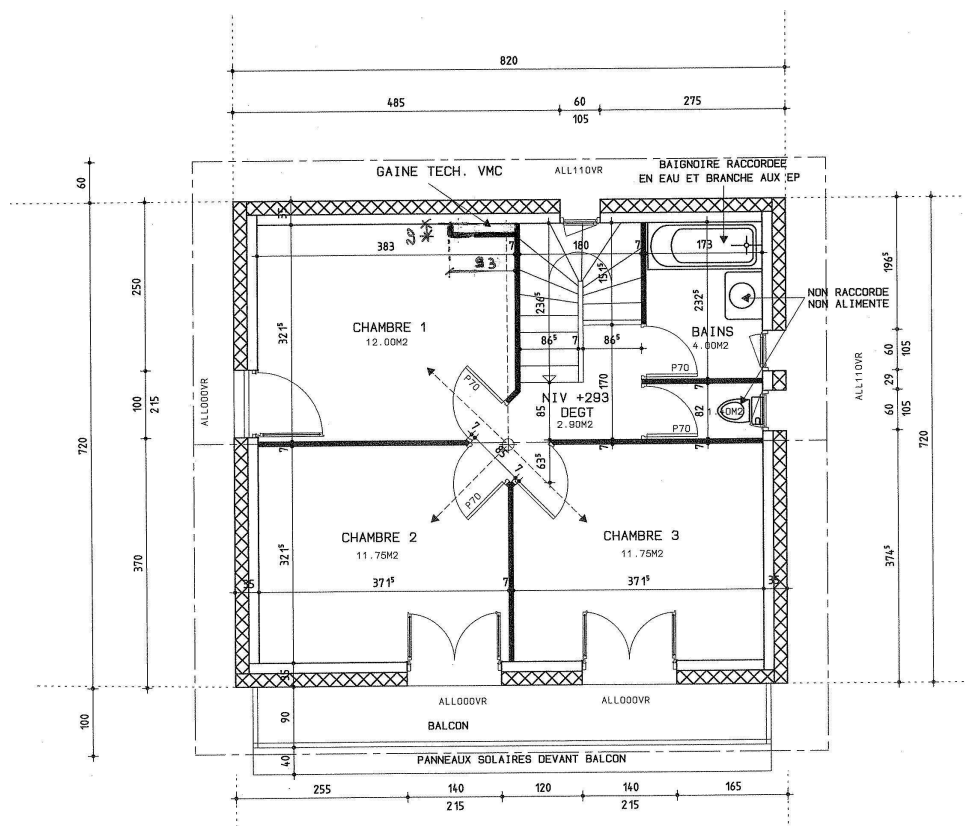
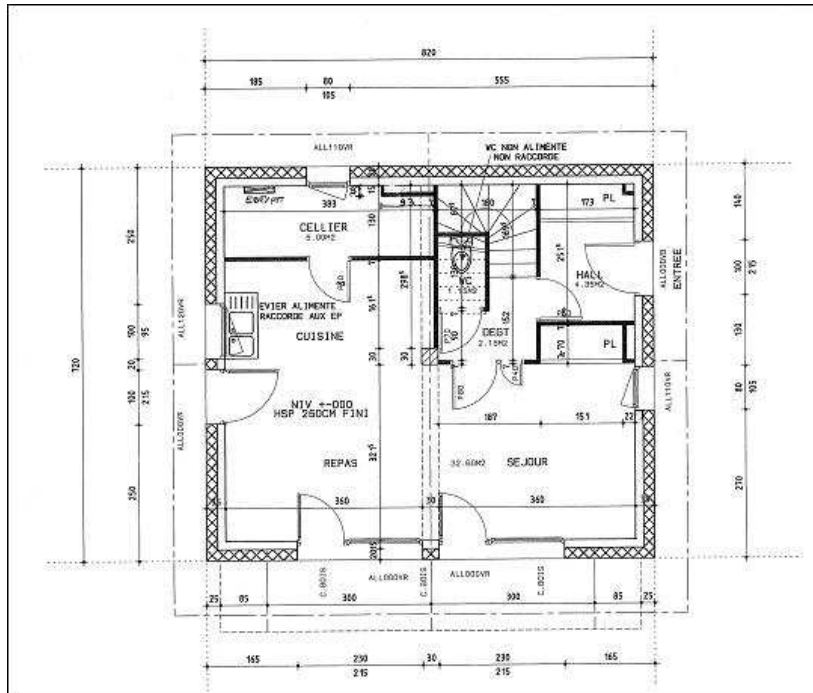
Figure 35 – Plan de l'étage de la maison I-DM

INES 2  
COUPE DE PRINCIPLE  
1/50  
PLANS bv 13/03/03

120  
60 360 360 120  
20.7 166° 166° 166° 166° 7.20  
90  
PENTE 50%  
TUILLE ALPHA 10 GLORIX ARDOISE  
CHEVETRE POUR FUTUR CF

3 PANNES LAMELLEES COLLEES 18/40  
22  
95  
traverse cable electrique photovoltaïque devant isolant extérieur  
210  
812°  
602°  
572  
faux plafond dalle 60x60  
1 PANNE LAMELLEE COLLEE 14/28cm pour solivage  
240  
322  
ETAGE NIV +283  
faux plafond dalle 60x60  
293  
REZ NIV +/-000  
174  
30  
160  
passerelle largeur 90cm 3 modiers 5/30cm bois de soutien 5/10 cm  
panne sabliere 24/14  
balcon bois + panneaux solaires + 3 consoles  
traverse pvc de 100mm pour tube panneaux solaires thermiques dans faux plafond aller vers cellier  
2 coles bois  
552  
Evac HYDROFUGE TYPE Goudron  
Ecran HYDROFUGE TYPE Goudron

152





## Annexe D: Composition des parois et propriétés thermo-physique des matériaux des maisons I-DM et I-BB

Type de paroi	Matériau	e [cm]	$\lambda$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/(kg.K)]
Mur extérieur Maison I-DM	Enduit extérieur	1	1	1450	500
	Parpaing	15	0,74	800	648
	Laine de verre	20	0,035	12	840
	Parpaing	15	0,74	800	648
	Plâtre	1,5	0,42	1200	837
Mur extérieur Maison I-BB	Enduit extérieur	1	1	1450	500
	Polystyrène extrudé	20	0,030	35	1400
	Béton Banché	15	1,75	2400	880
	Plâtre	1,5	0,42	1200	837
Plancher bas I-DM & I-BB	Polystyrène extrudé	20	0,030	35	1400
	Dalle pleine	16	2,5	2400	1000
	Chape béton	8	1,75	2400	880
Combles I-DM & I-BB	Laine de verre	40	0,035	12	840
	Plâtre	1,5	0,42	1200	837
Plancher intermédiaire I-DM & I-BB	Poutrelle	16	1,23	1300	648
	Dalle pleine	4	2,5	2400	1000
	Chape béton	8	1,75	2400	880
	Carrelage	1	0,41	1200	1000

**Table 8** – Propriétés thermo-physique des matériaux de constructions des parois opaques des maisons I-DM et I-BB

Type de paroi	Coefficient U [W/(m <sup>2</sup> .K)]
Mur extérieur Maison I-DM épaisseur $\cong 50$ cm	0,165
Mur extérieur Maison I-BB épaisseur $\cong 35$ cm	0,144
Plancher bas I-DM & I-BB épaisseur $\cong 42$ cm	0,147
Combles I-DM & I-BB épaisseur $\cong 41$ cm	0,11

**Table 9** – Coefficient de transmission thermique des parois des maisons I-DM et I-BB

Émissivité extérieur	0,9
Émissivité intérieur	0,9
coefficient d'absorption extérieur	0,5
coefficient d'absorption intérieur	0,3

**Table 10** – Propriétés de surface des parois opaques des maisons I-DM et I-BB

## Annexe E: Composition des menuiseries des maisons I-DM, I-BB et RT 2005

Type de vitrage	$U_w$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	facteur solaire [-]	Taux d'ouverture [%]
Double vitrage peu émissif, lame argon, cadre PVC	1,4	0,6	85
Triple vitrage peu émissif, lame argon, cadre PVC	1,1	0,45	85

**Table 11** – Propriétés des vitrages utilisés des maisons I-DM, I-BB et RT 2005

	Vitrage extérieur	Vitrage intérieur
Épaisseur	0,04	0,04
Transmission du rayonnement solaire en incidence normale	0,842	0,588
Réflexion solaire en incidence normale côté intérieur	0,076	0,312
Réflexion solaire en incidence normale côté extérieur	0,076	0,246
Transmission optique à incidence normale	0,9	0,889
Réflexion visible en incidence normale côté intérieur	0,082	0,048
réflexion visible en incidence normale côté extérieur	0,082	0,055
Transmission infrarouge en incidence normale	0	0
Émissivité infrarouge hémisphérique côté intérieur	0,837	0,037
Émissivité infrarouge hémisphérique côté extérieur	0,837	0,837
Conductivité [W/(m.K)]	1	1

**Table 12** – Propriétés physique des fenêtres double vitrage des maisons I-DM, I-BB et RT 2005

	Vitrage extérieur	Vitrage du milieu	Vitrage intérieur
Épaisseur	0,04	0,04	0,04
Transmission du rayonnement solaire en incidence normale	0,588	0,0842	0,588
Réflexion solaire en incidence normale côté intérieur	0,246	0,076	0,312
Réflexion solaire en incidence normale côté extérieur	0,312	0,076	0,246
Transmission optique à incidence normale	0,889	0,9	0,889
Réflexion visible en incidence normale côté intérieur	0,055	0,082	0,055
réflexion visible en incidence normale côté extérieur	0,048	0,082	0,055
Transmission infrarouge en incidence normale	0	0	0
Émissivité infrarouge hémisphérique côté intérieur	0,837	0,037	0,037
Émissivité infrarouge hémisphérique côté extérieur	0,837	0,837	0,037
Conductivité [W/(m.K)]	1	1	1

**Table 13** – Propriétés des fenêtres triple vitrage des maisons I-DM et I-BB

type de fenêtre	Épaisseur [m]	Mélange
Double vitrage	0,016	90% d'argon et 10% d'air
Triple vitrage	0,012	90% d'argon et 10% d'air

**Table 14** – Propriétés des gaz des fenêtres double et triple vitrage des maisons I-DM, I-BB et RT 2005

Conductivité [W/(m.K)]	2,326
Absorption solaire	0,9
Absorption du visible	0,9
Émissivité thermique hémisphérique	0,9

**Table 15** – Propriétés des cadres des maisons I-DM, I-BB et RT 2005

Épaisseur	0,008
Transmission solaire	0,02
Réflexion solaire	0,66
Transmission du visible	0,02
Réflexion du visible	0,66
Émissivité thermique hémisphérique	0,92
Conductivité [W/(m.K)]	0,17
Distance entre le volet et le vitrage [m]	0,03

**Table 16** – Propriétés des volets roulants des maisons I-DM, I-BB et RT 2005

Orientation	Menuiserie	Surface [m <sup>2</sup> ]	Type
Sud	Porte fenêtre Séjour (x2)	5,05	Double vitrage
	Porte fenêtre Chambre (x2)	3,28	Double vitrage
Ouest	Cuisine	0,95	Double vitrage
	Porte fenêtre Repas	2,15	Double vitrage
	Porte fenêtre Chambre	2,15	Double vitrage
Est	fenêtre Séjour	0,84	Double vitrage
	fenêtre Sanitaires (x2)	0,63	Double vitrage
Nord	fenêtre Cellier	0,84	Triple vitrage
	fenêtre escalier	0,63	Triple vitrage
La façade Est possède une porte (2.25m x 1m) ayant comme coefficient de transfert thermique 0.8 [W/(m <sup>2</sup> .K)]			

**Table 17** – Dimension des ouvertures comprenant vitrage+cadre des maisons I-DM, I-BB et RT 2005

## Annexe F: Composition des parois et propriétés thermo-physique des matériaux de la maison RT 2005

Type de paroi	Matériau	e [cm]	$\lambda$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m³]	Cp [J/(kg.K)]
Mur extérieur	Enduit extérieur	1	0,5	1300	1000
	Parpaing	20	0,9	1100	1000
	Laine de verre	8	0,039	35	1030
	Plâtre	1,3	0,25	825	1008
Plancher bas	Polystyrène extrudé	10	0,035	18	1450
	Dalle pleine	20	1,7	2300	1000
	Chape béton	5	1,5	2000	1000
	Revêtement	0,4	0,25	1700	400
Plafond Combles	Laine de verre	12	0,039	35	1030
	OSB	1	0,13	35	1030
	Structure porteuse	5	1,5	2000	1000
	Plâtre	1,3	0,25	825	1008
Plancher intermédiaire	Revêtement	0,4	0,25	1700	400
	Dalle	4	1,7	2300	1000
	Poutre	0,15	1	1700	1000
	Plâtre	1,3	0,25	825	1008

**Table 18** – Propriétés thermo-physique des matériaux de constructions des parois opaques de la maison RT 2005

Type de paroi	Coefficient U [W/(m².K)]
Mur extérieur épaisseur $\cong 30,1$ cm	0,4
Plancher bas épaisseur $\cong 35,4$ cm	0,3
Combles épaisseur $\cong 19,3$ cm	0,26

**Table 19** – Coefficient de transmission thermique des parois de la maison RT 2005

## Annexe G: Les douze premières lignes du fichier météo d'EnergyPlus

<b>Ligne 1</b>	<b>LOCATION</b> ,Chambéry/Aix Bains,-,-,TMY2-74910,,45.65,5.88,0,239.0
<b>Ligne 2</b>	<b>DESIGN CONDITIONS</b> ,0
<b>Ligne 3</b>	<b>TYPICAL/EXTREME PERIODS</b> ,6,Summer - Week Nearest Max Temperature For Period,Extreme,7/20,7/26,Summer - Week Nearest Average Temperature For Period,Typical,6/29,7/ 5,Winter - Week Nearest Min Temperature For Period,Extreme,12/22,12/28,Winter - Week Nearest Average Temperature For Period,Typical,12/ 1,12/ 7,Autumn - Week Nearest Average Temperature For Period,Typical,10/20,10/26,Spring - Week Nearest Average Temperature For Period,Typical,4/12,4/18
<b>Ligne 4</b>	<b>GROUND TEMPERATURES</b> ,3,.5,,2.40,1.63,3.00,5.14,10.75,15.08,18.00,18.89,17.37, 14.01,9.52,5.36,2,,,5.24,3.87,4.15,5.29,9.04,12.43,15.15,16.60,16.29,14.39,11.29,8.01,4,,,7.60,6.19,5.88,6.30,8.43,10.71,12.81,14.27,14.61,13.78,11.97,9.75
<b>Ligne 5</b>	<b>HOLIDAYS/DAYLIGHT SAVINGS</b> ,No,0,0,0
<b>Ligne 6</b>	<b>COMMENTS 1</b> ,TMY2-74910
<b>Ligne 7</b>	<b>COMMENTS 2</b> , Ground temps produced with a standard soil diffusivity of 2.3225760E-03 m <sup>2</sup> /day
<b>Ligne 8</b>	<b>DATA PERIODS</b> ,1,1,Data,Sunday, 1/ 1,12/31
<b>Ligne 9</b>	1995,1,1,1,60,E7E7E7E7*0 ?4 ?4 ?4I4I4I4 ?0E7E7E7E7*0*0E7*0*0*0,4.7,3.7,93,98600,0,0,285,0,0,0,0,0,0,99990,218,1.1,10,5,777.7,77777,9,9999999 ?0,12,0.0000,0,88
<b>Ligne 10</b>	1995,1,1,2,60,E7E7E7E7*0 ?4 ?4 ?4I4I4I4 ?0E7E7E7E7*0*0E7*0*0*0,4.5,3.6,94,98600,0,0,285, 0,0,0,0,0,0,99990,252,0.9,10,5,777.7,77777,9,9999999 ?0,12,0.0000,0,88
<b>Ligne 11</b>	1995,1,1,3,60,E7E7E7E7*0 ?4 ?4 ?4I4I4I4 ?0E7E7E7E7*0*0E7*0*0*0,4.3,3.5,94,98600,0,0,284, 0,0,0,0,0,0,99990,249,0.7,10,5,777.7,77777,9,9999999 ?0,12,0.0000,0,88
<b>Ligne 12</b>	1995,1,1,4,60,E7E7E7E7*0 ?4 ?4 ?4I4I4I4 ?0E7E7E7E7*0*0E7*0*0*0,4.2,3.4,95,98600,0,0,283, 0,0,0,0,0,0,99990,264,0.8,10,5,777.7,77777,9,9999999 ?0,12,0.0000,0,88

**Table 20** – Les douze premières lignes du fichier météo d'EnergyPlus pour Chambéry/Aix les Bains

Cette annexe représente les douze premières lignes du fichier météo d'EnergyPlus pour la ville de Chambéry/Aix les Bains. Les huit premières lignes sont des informations sur la localisation (longitude, latitude, GMT, altitude) , les conditions annuelles, les températures mensuelles du sol, les périodes de vacances et la période considérée dans le fichier (pas de temps, début et fin du fichier). Chaque ligne commence par un mot clé ("LOCATION", "DESIGN CONDITIONS"...). A partir de la ligne 9, c'est les données météorologiques.

Deux lignes sont particulièrement intéressantes la première, LOCATION, et la huitième, DATA PERIODS. Pour la ligne LOCATION, les données renseignées sont dans l'ordre d'apparition : la ville, l'état ou la province, le pays, la source du fichier, le WMO Number (numéro qui permet de reconnaître la station météo), la latitude, la longitude, le fuseau horaire et l'altitude. Dans notre cas plusieurs données ne sont pas renseignées et sont remplacées par "-". Pour la ligne DATA PERIODS, les données renseignées sont dans l'ordre d'apparition : le nombre de période, le pas de temps (1 = une heure, 60 = 1 minute, 30 = 2 minutes), jour de la semaine auquel la simulation débute (lundi, mardi...), jour du début du fichier, dernier jour du fichier.



## Annexe H: Caractéristiques des colonnes du fichier météo d'EnergyPlus

n ° de colonne	Description du paramètre	mesure ou valeur par défaut
1	Année	
2	mois	
3	jour	
4	heure	
5	minute	
6	data source	valeur par défaut
7	température extérieure sèche	mesure
8	température du point de rosée	calculer avec la température extérieur et l'humidité
9	humidité relative extérieure	mesure
10	pression atmosphérique	mesure
11	irradiance extraterrestre horizontal	valeur par défaut en fonction de la localisation
12	irradiance extraterrestre direct normal radiation	irradiance extraterrestre horizontal multiplié par la hauteur du soleil
13	rayonnement net (W/m <sup>2</sup> )	mesure
14	Rayonnement global horizontal (W/m <sup>2</sup> )	mesure
15	rayonnement direct normal (W/m <sup>2</sup> )	mesure
16	rayonnement diffus (W/m <sup>2</sup> )	mesure ou calcul
17	éclairage global horizontal	valeur par défaut
18	éclairage direct normal	valeur par défaut
19	éclairage diffus	valeur par défaut
20	luminance zénith (cd/m <sup>2</sup> )	valeur par défaut
21	direction du vent	mesure
22	vitesse du vent (km/h)	mesure
23	couverture totale du ciel <sup>a</sup>	valeur par défaut
24	Couvrent le ciel opaque <sup>b</sup>	valeur par défaut
25	visibilité	valeur par défaut

**Table 21** – Description des colonnes 1 à 25 des fichiers météo d'EnergyPlus

<sup>a</sup>. inclut la majoré du montant de ciel couvert, mais pas cachés (transparent), indiquée en dixièmes, de sorte que 0 indique un ciel clair et 1 (ou 10/10) indique un ciel complètement couvert

<sup>b</sup>. quantité de ciel complètement caché par les nuages

n ° de colonne	Description du paramètre	mesure ou valeur par défaut
<b>26</b>	Hauteur du plafond nuageux [m]	valeur par défaut
<b>27</b>	observation météorologique	valeur par défaut
<b>28</b>	code de l'observation météorologique	valeur par défaut
<b>29</b>	précipitation (mm)	mesure
<b>30</b>	épaisseur optique	valeur par défaut <sup>a</sup>
<b>31</b>	hauteur de la neige	valeur par défaut
<b>32</b>	nombre de jour depuis lequel il a neigé	valeur par défaut
<b>33</b>	Albedo	valeur par défaut
<b>34</b>	hauteur des précipitations	valeur par défaut
<b>35</b>	quantité des précipitations	valeur par défaut

**Table 22** – Description des colonnes 26 à 35 des fichiers météo d'EnergyPlus

---

*a.* caractérise la transparence du milieu atmosphérique, plus la visibilité est réduite plus l'épaisseur optique sera importante

## Annexe I: Modèle numérique de la ventilation double flux d'EnergyPlus

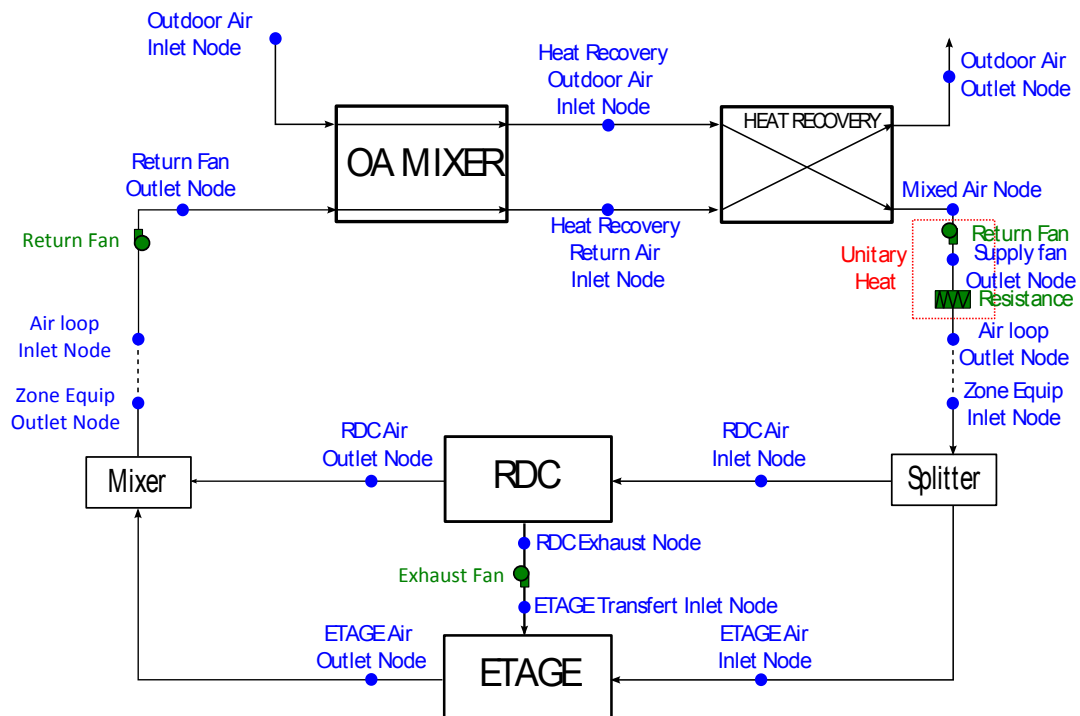


Figure 39 – Modèle numérique de la double flux utilisé dans EnergyPlus

---

## Bibliographie

---

- [1] Simlab (2011) software package for uncertainty and sensitivity analysis. Downloadable for free at : <http://simlab.jrc.ec.europa.eu>.
- [2] *Auxiliary EnergyPlus Programs : Extra programs for EnergyPlus*, 2010.
- [3] *EnergyPlus Engineering Reference, The Reference to EnergyPlus Calculations*, 2010.
- [4] *Getting Started with EnergyPlus, Basic Concepts Manual - Essential Information You Need about Running EnergyPlus*, 2010.
- [5] Sylvain Boulet. *Caractérisation du confort hygrothermique et acoustique dans les constructions à base de bois*. PhD thesis, Université de Savoie, 2009.
- [6] G.S. Brager and R.J. de Dear. Thermal adaptation in the built environment : a literature review. *Energy and Buildings*, 27 :83–96, 1998.
- [7] H. Breesch and A. Janssens. Performance evaluation of passive cooling in office buildings based on uncertainty and sensitivity analysis. *Solar energy*, 84 :1453–1467, 2010.
- [8] A. Brun. *Amélioration du confort d’été dans des bâtiments à ossature par ventilation de l’enveloppe et stockage thermique*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2011.
- [9] A. Brun, C. Spitz, E. Wurtz, and L. Mora. Behavioural comparison of some predictive tools used in a low energy building. In *Eleventh International IBPSA Conference*, 2009.
- [10] Ida Bryn and Per Arne Schiefloe. Atrium models for the analysis of thermal comfort and energy use : A report of task 12 building energy analysis and design tools for solar applications. Technical report, IEA, 1996.
- [11] S. Burhenne, D. Jacob, and G.P. Henze. Uncertainty analysis in building simulation with monte carlo techniques. In *SimBuild 2010 Fourth National Conference of IBPSA-USA*, New York City, New York, 2010.
- [12] L. Chahwane. *Valorisation de l’inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2011.

- [13] Fadi CHLELA. *Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie*. PhD thesis, Université de La Rochelle, 2008.
- [14] J.A. Clarke. *Energy simulation in building design, Second Edition*. Buttrworth Heinemann, 2010.
- [15] D.B. Crawley, J.W. Hand, and L.K. Lawrie. Improving the weather information available to simulation programs. In *Proceedings of Building Simulation 99*, volume 2, 1999.
- [16] D.B. Crawley, L.K. Lawrie, F.C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y.J. Huang, C.O. Pedersen, R.K. Strand, F.J. Liesen, D.E. Fisher, M.J. Witte, and J. Glazer. Energyplus : creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33 :319–331, 2001.
- [17] P. de Wilde and W. Tian. Predicting the performance of an office under climate change : A study of metrics, sensitivity and zonal resolution. *Energy and Buildings*, 42 :1674–1684, 2010.
- [18] S. de Wit and G. Augenbroe. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. *Energy and Buildings*, 34 :951–958, 2002.
- [19] E. Palomo del Battio and G. Guyon. Theoretical basis for empirical model validation using parameters space analysis tools. *Energy and buildings*, 35 :985–996, 2003.
- [20] E. Palomo del Battio and G. Guyon. Application of parameters space analysis tools for empirical model validation. *Energy and buildings*, 36 :24–33, 2004.
- [21] F. Domínguez-Munóz, J.M. Cejudo-López, and A. Carrillo-Andrés. Uncertainty in peak cooling load calculations. *Energy and Buildings*, 42 :1010–1018, 2010.
- [22] T. Duforestel, H. Bouia, O. Hartmann, J.J. Roux, and G. Krauss. Les outils de modélisation énergétique des bâtiments très basse consommation. In *Conference IBPSA France 2008*, 2008.
- [23] X. Faure. *Optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique*. PhD thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble, 2007.
- [24] Caroline Flory-Celini. *Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant*. PhD thesis, Université Lyon 1 Claude Bernard, 2008.
- [25] J.M. Fürbringer and C.A. Roulet. Confidence of simulation results : put a sensitivity analysis module in your model the IEA-ECBCS annex 23 experience of model evaluation. *Energy and buildings*, 30 :61–71, 1999.
- [26] F. Haldi and D. Robinson. On the behaviour and adaptation of office occupants. *Building and environment*, 43 :2163–2177, 2008.
- [27] R.H. Henninger and M.J. Witte. Energyplus testing with building thermal envelope and fabric load tests from ansi/ashrae standard 140-2007. Technical report, U.S. Departement of Energy, 2010.
- [28] R.H. Henninger and M.J. Witte. Energyplus testing with hvac equipment component tests. Technical report, U.S. Departement of Energy, 2010.

- [29] R.H. Henninger and M.J. Witte. Energyplus testing with IEA BESTEST in-depth ground coupled heat transfer tests related to slab-on-grade construction. Technical report, U.S. Department of Energy, 2010.
- [30] R.H. Henninger, M.J. Witte, and D.B. Crawley. Analytical and comparative testing of energyplus using IEA HVAC BESTEST E100 E200 test suite. *Energy and Buildings*, 36 :855–863, 2004.
- [31] Julien Jacques. *Contribution à l’analyse de sensibilité et à l’analyse discriminante généralisée*. PhD thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 2005.
- [32] S.Ø. Jensen. Validation of building energy simulation programs : a methodology. *Energy and Buildings*, 22 :133–144, 1995.
- [33] Ron Judkoff. Final task management report : IEA - solar heating and cooling program, task 34, testing and validation of building energy simulation tools. Technical report, IEA, 2008.
- [34] E. Krügera and B. Givoni. Thermal monitoring and indoor temperature predictions in a passive solar building in an arid environment. *Building and Environment*, 43 :1792–1804, 2008.
- [35] A. Lenoir, E. Ottenwelter, A. Bornarel, O. Hernandez, and F. Garde. État de l’art des bâtiments à énergie positive en france. retour d’expérience et comparaison des consommations énergétiques calculées en phase de conception et mesurées en phase d’utilisation du bâtiment. In *conférence IBPSA France*, 2010.
- [36] I. Macdonald and P. Strachan. Practical application of uncertainty analysis. *Energy and Buildings*, 33 :219–227, 2001.
- [37] I.A. Macdonald and J.A. Clarke. Applying uncertainty considerations to energy conservation equations. *Energy and Buildings*, 39 :1019–1026, 2007.
- [38] Iain Alexander Macdonald. *Quantifying the effects of uncertainty in building simulation*. PhD thesis, University of Strathclyde, 2002.
- [39] T.A. Mara. *Contribution à la validation globale d’un logiciel de simulation thermo-aéraulique de bâtiment : proposition de nouveaux outils d’aide à la validation Décembre 2000*. PhD thesis, Université de la Réunion, 2000.
- [40] T.A. Mara. Extension of the RBD-FAST method to the computation of global sensitivity indices. *Reliability Engineering and System Safety*, 94 :1274–1281, 2009.
- [41] T.A. Mara, H. Boyer, and F. Garde. Parametric sensitivity analysis of a test cell thermal model using spectral analysis. *Journal of solar energy engineering*, 124 :237–242, 2002.
- [42] T.A. Mara and O. Rakoto Joseph. Comparison of some efficient methods to evaluate the main effect of computer model factors. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 78 :167–178, 2008.
- [43] K.J. McCartney and J.F. Nicol. Developing an adaptive control algorithm for europe. *Energy and Buildings*, 34 :623–635, 2002.
- [44] O. Mejri. *Développement de méthodes de diagnostic énergétique des bâtiments*. PhD thesis, Universités de Tunis El Manar et Bordeaux 1, 2011.

- [45] L. Mora. *Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet*. PhD thesis, Université de le Rochelle, 2003.
- [46] M.D. Morris. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33 :139–245, 1991.
- [47] B. Moujalled. *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés*. PhD thesis, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007.
- [48] J. Neymark and R. Judkoff. International energy agency building energy simulation test and diagnostic method for heating, ventilating, and air-conditioning equipment models (HVAC BESTEST) volume 1 : Cases E100 E200. Technical report, IEA and NREL, 2002.
- [49] J. Neymark and R. Judkoff. International energy agency building energy simulation test and diagnostic method for heating, ventilating, and air-conditioning equipment models (HVAC BESTEST) volume 2 : Cases E300 E54. Technical report, IEA and NREL, 2004.
- [50] J. Noël, J.-J. Roux, and J. Virgone. présentation et perspectives du logiciel codyba. In *Journée thématique SFT-IBPSA*, 2005.
- [51] J. Page. *Simulating Occupant Presence and Behaviour in Buildings*. PhD thesis, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2007.
- [52] A.A Peppes, M. Santanmouris, and D.N. Asimakopoulos. Experimental and numerical study of buoyancy-driven stairwell flow in a three storey building. *Building and environment*, 37 :497–506, 2002.
- [53] M.A. Piette, S.K. Kartar, and P. Haves. Analysis of an information monitoring and diagnostic system to improve building operations. *Energy and Building*, 33 :783–791, 2001.
- [54] N. Rahni, N. Ramdani, Y. Candau, and P. Dalicieux. Application of group screening to dynamic building energy simulation models. *Computation and Simulation*, 57 :285–304, 1997.
- [55] T. Salomon, R. Mikolasek, and B. Peuportier. Outil de simulation thermique du bâtiment, comfie. In *Journée thématique SFT-IBPSA*, 2005.
- [56] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, and S. Tarantola. *Global Sensitivity Analysis. The primer*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [57] A. Saltelli, S. Tarantola, and F. Campolongo. Analysis as an ingredient of modeling. *Statistical Science*, 15 :377–395, 2000.
- [58] L. Stephan. *Modélisation de la Ventilation Naturelle pour l'Optimisation du Rafraîchissement Passif des Bâtiments*. PhD thesis, Université de Savoie, 2010.
- [59] P. A. Strachan, G. Kokogiannakis, and I.A. Macdonald. History and development of validation with the esp-r simulation program. *Building and Environment*, 43 :601–609, 2008.

- [60] S. Tarantola, D. Gatelli, and T.A. Mara. Random balance designs for the estimation of first order global sensitivity indices. *Reliability Engineering and System Safety*, 91 :717–727, 2006.
- [61] P. Tittlein. *Environnements de simulation adaptés à l’étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation*. PhD thesis, Université de Savoie, 2008.
- [62] A. Weber, M. Koschenz, V. Dorer, M. Hiller, and S. Holst. TRNFLOW, a new tool for the modelling of heat, air and pollutant transport in buildings within TRNSYS. *Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands*, 2003.
- [63] M. Wetter, P. Haves, M.A. Moshier, and E.F. Sowell. Using spark as a solver for modelica. In *SimBuild 2008 Third National Conference of IBPSA-USA*, 2008.
- [64] E. Wurtz. *Modélisation tridimensionnelle des transferts thermiques et aérodynamiques dans le bâtiment en environnement orienté objet*. PhD thesis, Ecole des ponts, 1995.